

การประยุกต์ใช้ไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
ในระบบการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**APPLICATION OF THERMOELECTRIC MODULE
FOR IMPROVING OF EFFICIENCY IN LOW
TEMPERATURE DRYING SYSTEM**

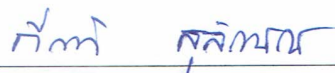


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process
System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**


การประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบ
การอบแห้งอุณหภูมิต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยี


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผศ. ดร.ทีรติ สุตักษณ์)


ประธานกรรมการ


(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

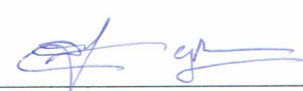
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)

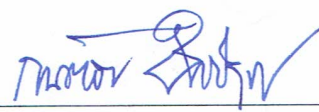
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


(ผศ. ดร.ประกิต ทิมจำ)

กรรมการ


(อ. ดร.สามารถ บุญอุอาจ)

กรรมการ


(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาคณาจารย์


(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พชร ว่องไพศาลกิจ : การประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบ
การอบแห้งอุณหภูมิต่ำ (APPLICATION OF THERMOELECTRIC MODULE FOR
IMPROVING OF EFFICIENCY IN LOW TEMPERATURE DRYING SYSTEM)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กระวี ศรีอำรรค, 103 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำต้นแบบ
มีขนาด 216 ลิตร โดยมีการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นที่ติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก
รุ่น TEC12710 จำนวน 12 ตัว ที่สามารถสร้างความร้อนและความเย็นขึ้นทั้งสองด้านของแผ่น
ก่อนนำไปอุ่นอากาศด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อผลิตเป็นอากาศอบแห้ง ในการทดลองได้ทำการควบคุม
อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 54 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังทำการควบคุมอัตราการไหลอากาศผ่าน
เครื่องอบแห้ง 0.0288 กิโลกรัมต่อวินาที โดยแบ่งอากาศไหลผ่านเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นด้านร้อน
เป็น 0.023 กิโลกรัมต่อวินาที และด้านเย็นเป็น 0.0058 กิโลกรัมต่อวินาที ทดสอบการทำงานของ
เครื่องด้วยการอบแห้งพริกชี้หนูแดงปริมาณ 3.5 กิโลกรัม และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
การอบแห้งเมื่อเปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (TEC + Heater)
กับระบบที่เปิดการทำงานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (Heater) แล้วนำมาเปรียบเทียบผลกับ
พริกชี้หนูแดงที่ตากแห้งด้วยแสงแดดตามธรรมชาติ ผลที่ได้คือ เครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นสามารถ
ควบคุมความชื้นจากอากาศอบแห้งด้วยค่า MER 0.083 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง ด้วยด้านเย็น
ของ TEC นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิ (อุ่นอากาศชั้นต้น) ให้แก่อากาศได้ประมาณ
10 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของอากาศอบแห้งที่ดีขึ้น และยังลดภาระการทำงานของ
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยผลที่ได้สอดคล้องกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานของ
เครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นที่มีค่า DR สูงกว่า, SMER สูงกว่า และ SEC ต่ำกว่า ระบบที่เปิดการทำงาน
เฉพาะฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นสามารถลด
ระยะเวลาในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงได้ถึง 10 ชั่วโมง และยังประหยัดพลังงานกว่าการใช้ฮีตเตอร์
เพียงอย่างเดียว โดยผลพริกชี้หนูแดงที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองระบบนั้น
มีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการนำพริกชี้หนูไปตากด้วยแสงแดดธรรมชาติ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา WRS

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กระวี ศรีอำรรค

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม พชร ว่องไพศาลกิจ

PATCHARA WONGPAISARNKIT : APPLICATION OF
THERMOELECTRIC MODULE FOR IMPROVING OF EFFICIENCY
IN LOW TEMPERATURE DRYING SYSTEM. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, Ph.D., 103 PP.

LOW TEMPERATURE DRYER/THERMOELECTRIC MODULE/RED CHILIES/
EFFICIENCY

This research objective was to design and fabricate a 216 liters low temperature dryer with a preheater. The preheater was installed 12 pieces of thermoelectric module model TEC12710 that can generate heat to hot side and can make the other side cool. The passed air from preheater flows through heater for heat up the temperature of drying air. In an experiment, dryer chamber's temperature was controlled at 54 °C with 0.0288 kg_{air}/s air flow rate that separate to hot side of preheater 0.023 kg_{air}/s and cool side 0.0058 kg_{air}/s. For the prototype test, red chilies were selected to be a sample for drying with two cases: using preheater to assisted main heater (TEC + Heater) and using only main heater (Heater). The results of experiment showed that the preheater can reduced moisture from air with MER 0.083 kg_{water}/h by cool side's TEC and can heat up air about 10 °C by hot side's TEC. The preheater effects on a good quality of drying air and it can reduce the load of main heater. The drying efficiency of TEC + Heater case are higher than Heater case in DR, SMER and gives lower SEC than Heater case. In addition, the using of preheater to assist main heater case can reduced drying time about 10 hours and more save energy when compared with using only heater case. The comparison between dried red chilies by the prototype dryer and sundried, found that

the dried red chilies by the prototype dryer have less color changed than the sundried red chilies.



School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature *Patchara*

Advisor's Signature *Kankee Treeammak*

Co-Advisor's Signature *Amir*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยไปตีพิมพ์วารสารวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งชี้แนะแนวทางที่สามารถทำงานได้สำเร็จลุล่วง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำ ในการทำปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยไปตีพิมพ์วารสารวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกฤษณ์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยชี้แนะ ส่วนที่ผิดพลาดในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกิต ทิมขำ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบและชี้แนะส่วนที่ผิดพลาดในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และชี้แนะส่วนที่ผิดพลาดในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิต และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่สำหรับงานวิจัย รวมถึงบุคลากรสำนักวิศวกรรมศาสตร์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำแนะนำ เรื่องเอกสารต่าง ๆ

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างดี และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา ขอขอบคุณนายทิวา สายประดิษฐ และเพื่อน ๆ ในกลุ่มอาจารย์ที่ปรึกษาเดียวกันที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้จนสำเร็จการศึกษา อีกทั้งขอขอบคุณนางสาวไอริน วรรณทอง และนางสาวนิลาวัลย์ แก้วภักดี ที่เป็นผู้ช่วยงานวิจัย ทั้งช่วยประกอบอุปกรณ์ และช่วยเหลือในการบันทึกผล จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

พชร ว่องไพศาลกิจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิด.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การอบแห้งผลผลิตทางเกษตร.....	6
2.1.1 บทบาทของอากาศอบแห้ง.....	6
2.1.2 พฤติกรรมการอบแห้ง.....	8
2.1.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content).....	11
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง.....	12
2.2 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน.....	14
2.3 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module).....	18
2.4 สรุปแนวคิดในการดำเนินการ.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	อุปกรณ์และวิธีการ.....	22
3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.2	การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้น.....	22
3.2.1	ห้องอบแห้ง.....	23
3.2.2	ปริมาณพริกชี้หนูแดงสำหรับห้องอบแห้ง.....	23
3.2.3	การทดสอบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกชั้นต้น.....	24
3.2.4	เครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นและฮีตเตอร์ไฟฟ้า.....	26
3.2.5	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	29
3.3	ขั้นตอนการทำวิจัย.....	32
3.3.1	การตากแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยวิธีทางธรรมชาติ.....	33
3.3.2	การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบอบแห้ง.....	33
3.3.3	การเก็บข้อมูลผลการทดลอง.....	34
3.3.4	การหาน้ำหนักแห้ง.....	35
3.3.5	ความชื้นของตัวอย่างจากการทดสอบ.....	37
3.3.6	การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	38
3.3.6.1	กราฟแสดงพฤติกรรมการอบแห้ง (Drying curve).....	38
3.3.6.2	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate).....	38
3.3.6.3	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate).....	38
3.3.6.4	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption).....	39
3.3.7	การตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง.....	39
4	ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล.....	44
4.1	ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เทอร์โมอิเล็กทริก.....	44
4.2	การประเมินสมรรถนะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	พฤติกรรมกรอบแห้งเมื่ออบแห้งพริกชี้หนูแดง ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	45
4.2.2	ค่าสมรรถนะที่ได้จากการทดสอบ.....	49
4.2.3	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate).....	51
4.2.4	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate).....	52
4.2.5	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy Consumption) ค่าสมรรถนะที่ได้ จากการทดสอบ.....	53
4.3	การประเมินคุณภาพหลังการอบแห้ง.....	56
4.3.1	ผลของการนำพริกชี้หนูแดงไปทำการตากแห้งด้วย วิธีทางธรรมชาติ.....	56
4.3.2	ผลของการเปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในเครื่องอบแห้ง.....	57
4.3.3	ผลของการเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว.....	57
4.3.4	การเปรียบเทียบด้วยค่าสี.....	58
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	61
5.1.1	ผลของการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น (TEC).....	61
5.1.2	การประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้ง ต้นแบบ.....	61
5.1.2.1	พฤติกรรมกรอบแห้ง (Drying curve).....	61
5.1.2.2	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate).....	62
5.1.2.3	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate).....	62
5.1.2.4	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน (Specific energy consumption).....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การประเมินคุณภาพหลังการอบแห้ง.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	68
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	74
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	103



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการทดสอบขั้นต้น 25
3.2	ผลการทดลองที่ดีที่สุดของแต่ละค่าสมรรถนะ 26
3.3	ผลของการปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก 28
4.1	ผลของการอบแห้งพริกชี้หนูแดงและค่าสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง ต้นแบบด้วยระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า 49
4.2	ผลของการอบแห้งพริกชี้หนูแดงและค่าสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง ต้นแบบด้วยระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 50
4.3	ตัวแปรค่าสีของผล/ก้านพริกชี้หนูแดงสดและผ่านการอบแห้งในแต่ละกรรมวิธี 59
4.4	ผลของการเปรียบเทียบค่าสีของผลและก้านของพริกชี้หนูแดงเมื่อนำไปทำให้แห้ง ด้วยกรรมวิธีที่ต่างกัน 60
ก.1	ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า 69
ก.2	ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 71
ก.3	ผลของการปรับสภาวะอากาศของเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น 73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	วิธีการอบแห้ง โดยแบ่งตามการถ่ายเทความร้อน 3
2.1	Psychrometric Chart 7
2.2	ความชื้นของผลผลิตทางเกษตรกับการอบแห้ง 9
2.3	การแสดงผลการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาการอบแห้ง 10
2.4	ซอร์พชันไอโซเทอร์ม 12
2.5	แผนผังของเครื่องอบแห้งบ่มความร้อนระบบอัดไอ 15
2.6	การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 19
3.1	แบบจำลองห้องอบแห้ง 23
3.2	แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการติดตั้งครีบน้ำร้อนทั้งสองด้าน 24
3.3	เครื่องมือทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกเบื้องต้น 25
3.4	เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น 27
3.5	การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น 28
3.6	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเครื่องอบแห้งพร้อมเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น 30
3.7	สภาวะอากาศในแต่ละตำแหน่งของชุดเครื่องอบแห้ง 31
3.8	การตากแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยวิธีทางธรรมชาติ 33
3.9	การจัดวางพริกชี้หนูแดงสำหรับการอบแห้ง 34
3.10	พริกชี้หนูแดงหลังจากสิ้นสุดการอบแห้ง 35
3.11	ตู้อบลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นหลงเหลือในตัวอย่างพริกชี้หนูแดง จากการทดลองและการบรรจุตัวอย่างอบแห้งในตู้อบลมร้อน 36
3.12	พริกชี้หนูแดงหลังจากไล่ความชื้นหลงเหลือด้วยตู้อบลมร้อน 36
3.13	การชั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดง 37
3.14	เครื่องวัดสี 40
3.15	ความสัมพันธ์ของตัวแปรของค่าสี (L^* , a^* และ b^*) 40
3.16	การเตรียมการพริกชี้หนูแดงสำหรับนำไปวัดค่าสี 41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทดสอบการวัดสี	42
3.18 การปั่นพริกชี้หนูแดงสำหรับการวัดสี	42
3.19 การจัดวางอุปกรณ์บรรจุตัวอย่างวัดสี	43
4.1 การควบคุมความชื้นจากอากาศที่เกิดขึ้นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก	44
4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นพริกชี้หนูแดงกับเวลาในการอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเมื่อเปิดการทำงานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45
4.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นพริกชี้หนูแดงกับเวลาในการอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเมื่อเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว	47
4.4 พฤติกรรมการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่เปิดและปิด การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น	48
4.5 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิดใช้ เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า เพียงอย่างเดียว	51
4.6 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิด ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า เพียงอย่างเดียว	52
4.7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิด ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า เพียงอย่างเดียว	54
4.8 เปรียบเทียบความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์และพลังงานสะสมในแต่ละ ช่วงเวลาในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	55
4.9 เปรียบเทียบความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์และพลังงานสะสมในแต่ละ ช่วงเวลาในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า เพียงอย่างเดียว	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	ผลของการนำพริกชี้หนูแดงไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ56
4.11	ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการผลิต อากาศอบแห้ง57
4.12	ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวในการผลิตอากาศอบแห้ง.....58



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TEC	=	อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
Heater	=	ฮีตเตอร์ไฟฟ้า
m_{air}	=	มวลของอากาศ, kg
m_a	=	มวลของอากาศแห้ง, kg
m_v	=	มวลเฉพาะส่วนของไอน้ำในอากาศ, kg
P	=	ความดันของอากาศ, kPa
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส, 8.314 J/kmol
V	=	ปริมาตรของอากาศ, m ³
P_a	=	ความดันของอากาศแห้ง, kPa
P_v	=	ความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำในอากาศ, kPa
MC_w	=	ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก, %wb
MC_d	=	ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db
m	=	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์, kg
m_d	=	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้ง, kg _{dry}
MC_{wt}	=	ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก ณ เวลาใด ๆ, %wb
MC_{wi}	=	ความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น, %wb
%wb	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก
%db	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง
MC_{emc}	=	ปริมาณความชื้นสมดุล, %wb
COP	=	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
Q_{in}	=	ความร้อนที่อากาศได้รับ, W
W_{cond}	=	พลังงานที่ใช้กับคอยล์ร้อน, W
DR	=	อัตราการอบแห้ง, kg _{water} /h หรือ %db/h
m_i	=	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปอบแห้ง, kg
m_f	=	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบแห้ง, kg
t	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SMER	=	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$
P_e	=	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$
MER	=	อัตราควบแน่นน้ำ, kg/h
\dot{m}_c	=	อัตราการไหลของอากาศ, kg/h
\dot{H}	=	ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}$
DHT22	=	ชื่อรุ่นของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น
\dot{Q}_h	=	พลังงานความร้อน, W
$\dot{Q}_{\text{heat up}}$	=	พลังงานความร้อนที่ต้องการเพิ่ม, W
h	=	เอนทาลปี, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$L^*(+)$	=	หน่วยสีแสดงความเป็นสีขาว
$L^*(-)$	=	หน่วยสีแสดงความเป็นสีดำ
$a^*(+)$	=	หน่วยสีแสดงความเป็นสีแดง
$a^*(-)$	=	หน่วยสีแสดงความเป็นสีเขียว
$b^*(+)$	=	หน่วยสีแสดงความเป็นสีเหลือง
$b^*(-)$	=	หน่วยสีแสดงความเป็นสีน้ำเงิน
ΔE	=	ค่าแสดงความแตกต่าง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้ผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านการอบแห้งทั้งผัก และผลไม้ต่างก็เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเพิ่มคุณค่าทางอาหาร อีกทั้งยังเพิ่มสีสันให้กับอาหารได้ จากรายงานของธิดาวัฒน์ สิริพันธุ์กุล (2550) พบว่าปัจจัยด้านคุณภาพที่มีอิทธิพลต่อผู้บริโภคในการเลือกซื้อผักอบแห้งคือ ผักอบแห้งที่มีสีสดสวย น่ารับประทาน ความปลอดภัยต่อการบริโภค และสามารถนำไปผสมลงในอาหารได้อย่างสะดวก และเหมาะสม ในส่วนสารอาหารของผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำผลผลิตนั้นจะสามารถคงสารอาหารในตัวเองได้ (Harmony House Foods, Inc., 2014) นอกจากผัก และผลไม้อบแห้งแล้ว พืชสมุนไพรของไทยที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำยังสามารถคงสรรพคุณทางยาได้ ซึ่งในปัจจุบันสมุนไพรอบแห้งได้รับการส่งเสริมการใช้เป็นส่วนผสมของยา รักษา บำบัด และได้ถูกใช้แทนยาแผนปัจจุบันในการรักษาระดับคลินิก (สุภาพรณ์ ปิติพร, 2552) เช่น นำสมุนไพรอบแห้งไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แคปซูลฟ้าทะลายโจร และแคปซูลมะระขี้นก สำหรับใช้บรรเทาอาการไข้หวัดระยะแรกและอาการร้อนใน ขมในช่องปากและจึงใช้บรรเทาอาการจุกเสียดในระบบทางเดินอาหาร เถาวัลย์เปรียงที่ใช้แก้ภัยและขับปัสสาวะ และครีมไพรที่ใช้บรรเทาอาการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ เป็นต้น

ขั้นตอนการแปรรูปพืชผักและสมุนไพรด้วยกระบวนการอบแห้งมีหลักการที่สำคัญคือการขจัดความชื้นออกจากผลผลิตเพื่อการเก็บรักษาหรือนำไปแปรรูปเพื่อจำหน่ายต่อ ซึ่งหลักการอบแห้งนั้นสามารถแบ่งเป็นวิธีการหลักได้ 2 วิธี (เสริม จันทน์ฉาย, 2560) ได้แก่ การตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ (Natural sun drying) ซึ่งสามารถทำได้ง่าย และประหยัดค่าใช้จ่าย แต่อย่างไรก็ตามการตากแห้งด้วยแสงแดดธรรมชาติต้องใช้ระยะเวลาหลายวัน และในบางฤดูกาลทำไม่ได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมสภาวะอากาศได้ผลิตภัณฑ์ที่แห้งไม่เพียงพอจะกลายเป็นแหล่งสะสมของจุลินทรีย์ที่เป็นพิษได้ในภายหลัง อีกวิธีการคือ การใช้เครื่องอบแห้งเชิงกล (Mechanical Dryer) มาใช้สำหรับการขจัดความชื้นออกจากผลผลิต เทคนิคการอบแห้งด้วยความร้อนระบบอัดไอน้ำเป็นหนึ่งในการใช้เครื่องอบแห้งเชิงกลที่สามารถผลิตอากาศอุณหภูมิสูง และความชื้นต่ำ ซึ่งเหมาะสม

ต่อการนำไปอบแห้ง สามารถใช้ออบแห้งได้ทั้งพืชผักและสมุนไพรโดยมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้ และถูกสุขลักษณะ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552) อย่างไรก็ตาม บั้มความร้อนระบบอัดไอที่นิยมใช้ใน ปัจจุบันใช้สารทำความเย็น ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ระบบที่ใช้สารทำความเย็น ที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมีราคาสูงและ คัดแปลงเป็นบั้มความร้อนสำหรับการอบแห้งได้ยาก ปัจจุบันอุปกรณ์ที่สามารถผลิตอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูง และความชื้นต่ำได้ดีคือ อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่สามารถผลิตความร้อน และความร้อนด้วยการจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมี ราคาต่ำ ขนาดเล็กกระทัดรัดติดตั้งในระบบได้ง่าย และใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานมีความสะดวก ในการใช้งานผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาเป็นเครื่องอุ่นอากาศ สำหรับเครื่องอบแห้งผลผลิตทางเกษตร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเครื่องอุ่นอากาศ ขึ้นต้นสำหรับป้อนให้แก่เครื่องอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำ โดยต้องการให้เป็นเครื่องช่วยลด ความชื้นและเพิ่มความร้อนแก่อากาศอบแห้งก่อนนำไปผ่านอุปกรณ์ทำความร้อนหลักสำหรับ เครื่องอบแห้งที่มีขนาดเหมาะสมกับการผลิตระดับวิสาหกิจขนาดเล็ก ทดสอบการอบแห้งกับพืชผัก หรือสมุนไพรตัวอย่าง พร้อมทั้งเพื่อศึกษาประสิทธิภาพ สมรรถนะการทำงานของระบบอบแห้ง และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบ และสร้างต้นแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำแบบเทอร์โมอิเล็กทริก
2. เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น
3. เพื่อประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบขนาด 216 ลิตร และติดตั้งเครื่องอุ่น อากาศขึ้นต้น (เทอร์โมอิเล็กทริก) ร่วมกับขดลวดความร้อนในการผลิตอากาศอบแห้ง
2. ทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้พริกขี้หนูแดงเป็นตัวอย่างใน การอบแห้ง
3. ทดสอบเครื่องอบแห้ง 2 ระบบ คือ
 - 1) เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับขดลวดความร้อน
 - 2) เปิดการทำงานของขดลวดความร้อนเพียงอย่างเดียว

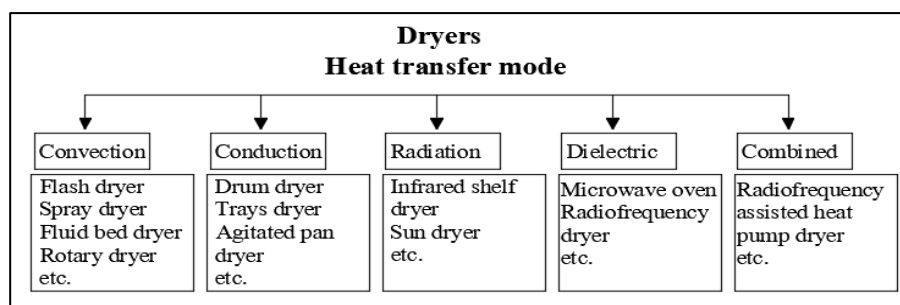
4. ประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องด้วยค่าการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) อัตราการอบแห้ง (DR) อัตราการควบแน่น (MER) และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

5. ประเมินคุณภาพของผลิตผลหลังการอบแห้งด้วยสมบัติทางกายภาพคือ สี และความชื้นในผลิตภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ และผลผลิตพริกสด

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิด

การอบแห้ง หรือการลดความชื้นเป็นเทคนิคในการถนอมอาหารชนิดหนึ่ง ที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยมีหลักการคือ ทำการขจัดความชื้นออกจากผลิตผลทางเกษตร โดยความชื้นสุดท้ายที่เหมาะสมแก่การเก็บรักษาของผลิตผลส่วนใหญ่ไม่ควรเกิน 15%wb (Paine, 1992) เนื่องจากเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จำพวก รา ยีสต์ และแบคทีเรีย ซึ่งส่งผลให้เกิดการเน่าเสียแก่ผลิตผลได้ โดยการอบแห้งนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการขจัดความชื้นออกจากผลิตผลทางเกษตร (Rahman and Perera, 2007) โดยสามารถแบ่งวิธีการอบแห้งตามหลักการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

1. การพาความร้อน ทำได้โดยการใช้ลมร้อนไหลผ่านผลิตผลที่ต้องการอบแห้ง เพื่อทำการดึงความชื้นออกจากตัว
2. การนำความร้อน ทำได้โดยการใช้ความร้อนแก่ผลิตผลที่นำความร้อนได้ดีด้วยการนำมาสัมผัสกับแหล่งความร้อนเพื่อไล่ความชื้นออก
3. การแผ่รังสี ทำได้โดยการใช้รังสีความร้อน หรือนำไปตากแดดธรรมชาติ
4. ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าประกอบ เช่น ไมโครเวฟ หรือใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอบแห้ง
5. แบบผสม คือการนำวิธีการอบแห้งที่ต่างกันมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน



รูปที่ 1.1 วิธีการอบแห้งโดยแบ่งตามการถ่ายเทความร้อน (Rahman and Perera, 2007)

นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำแห้งในแบบอื่น ๆ ที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการถ่ายเทความร้อน เช่น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) และการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying oven) โดยแต่ละวิธีในการทำแห้งทั้งหมดนั้นเป็นการนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ทั้งสิ้น ซึ่งแต่ละวิธีการก็มีการลงทุน และรูปแบบที่ต่างกันออกไป

การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เชิงกลสำหรับนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์เป็นการสร้างสภาวะอากาศที่เหมาะสมแก่การอบแห้งคือ มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งสามารถผลิตอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง วิธีการอบแห้งโดยทั่วไปส่วนใหญ่มักใช้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจจะสูงมากเกินจนส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งผลิตผลทางเกษตรบางชนิดไวต่อความร้อนทำให้เสื่อมคุณภาพได้ การลดความชื้นของอากาศก่อนนำไปอุ่นอากาศจึงเป็นแนวคิดที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราการอบแห้ง อีกทั้งยังรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และไม่ต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงจนเกินไป (Abasi, Minaei and Khoshtaghaza, 2016) ซึ่งระบบที่สามารถลดความชื้น และเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศได้คือ ระบบความร้อนระบบอัดไอ (Aemarine, 2012) โดยเป็นระบบที่สามารถสร้างความร้อนและความเย็นได้โดยใช้สารทำความเย็นที่ไหลเวียนภายในระบบ เนื่องจากสารทำความเย็นสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยการเปลี่ยนแปลงความดัน โดยมีอุปกรณ์เชิงกลทำหน้าที่ในการเปลี่ยนความดันของสารทำความเย็นคือ เครื่องอัดไอ (Compressor) กับวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ในส่วนของอุปกรณ์เชิงกลที่ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศคือ เครื่องระเหย (Evaporator) ทำให้อากาศที่ผ่านเย็นตัวลงและดึงความชื้นออกโดยการควบแน่น ก่อนนำไปผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) ทำให้อากาศที่ผ่านอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ได้อากาศที่เหมาะสมแก่การอบแห้ง แต่ระบบอัดไอนั้นมีอุปกรณ์ที่ซับซ้อน ติดตั้งยาก ซ่อมแซมได้ยากเมื่อเกิดการชำรุด และจำเป็นต้องใช้สารทำความเย็นในระบบ ซึ่งสารทำความเย็นนั้นหากเกิดการรั่วไหลจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อแก้ปัญหาข้อด้อยของระบบอัดไอจึงมีแนวคิดในการประยุกต์เพื่อนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งเป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำ สามารถสร้างความร้อนและความเย็นขึ้นทั้ง 2 ด้านของแผ่น โดย ศิริพร พิกุลทอง, วราพร ชมชื่น, ธัญรัตน์ เรียงภักดี และกระวี ตรีอำนรรค (2558) ที่ได้ทดสอบอบแห้งใบเตยหอมด้วยระบบทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 45°C พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และมีอัตราการทำแห้ง 0.93 g_{water}/h แต่ยังไม่สามารถพัฒนาระบบให้มีห้องอบแห้งขนาดเหมาะสมกับการผลิตระดับวิสาหกิจได้และยังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นแบบอัตโนมัติได้

ในการประยุกต์อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในระบบอบแห้งอุณหภูมิต่ำ ระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการควบแน่นน้ำในอากาศ และการอุ่นอากาศอบแห้ง ซึ่งใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ทำงาน และส่วนของห้องอบแห้ง ซึ่งจำเป็นจะต้องได้รับการคำนวณออกแบบให้มีความสัมพันธ์กันจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทำงานของระบบเมื่อแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับกระแสไฟฟ้า ด้านหนึ่งของอุปกรณ์จะดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่แผ่น ทำให้อุณหภูมิลดลง และความร้อนนี้จะส่งผ่านไปอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์ และถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม การทำงานนี้คล้ายกับ อุปกรณ์ระเหยและควบแน่นสารทำความเย็นในวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ อากาศอบแห้งผ่านด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อลดความชื้น แล้วนำอากาศมาผสมกับอากาศที่ผ่านด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่ออุ่นอากาศก่อนนำไปผ่านขดลวดความร้อน จึงนำไปอบแห้งผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ในห้องอบแห้งทำให้ความชื้นลดลงได้ที่อุณหภูมิการอบแห้งต่ำกว่าการใช้ลมร้อนทั่วไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อการเสียหายเนื่องจากความร้อน ยังคงคุณภาพดีอยู่ อีกทั้งเทอร์โมอิเล็กทริกจะอยู่ในสถานะของแข็ง (Solid state) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ไม่ใช้สารทำความเย็นจึงไม่ทำลายสภาวะแวดล้อม และไม่เสี่ยงเกิดการชำรุด รั่วไหลเหมือนการใช้สารทำความเย็น และเมื่อเกิดเสียหาย สามารถถอดเปลี่ยนอุปกรณ์ได้ง่ายและรวดเร็ว

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องอบแห้งผลิตผลทางเกษตรอุณหภูมิต่ำที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกช่วยในการอุ่นอากาศ
2. เข้าใจถึงพฤติกรรมของการอบแห้งตัวอย่างด้วยเครื่องอบแห้งที่มีการติดตั้งระบบเทอร์โมอิเล็กทริก
3. ทราบถึงการใช้พลังงานในระบบอบแห้ง เมื่อติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
4. ทราบถึงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้งผลผลิตทางเกษตร

การอบแห้งนั้นมีบทบาทสำคัญต่อผลิตผลทางเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากการอบแห้งสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษารวมไปถึงการลดปริมาตร และน้ำหนักของผลิตผลที่ทำกรอบแห้งเพื่อลดพื้นที่ หรือประหยัดต่อการบรรจุเก็บเป็นผลิตภัณฑ์อีกด้วย (ลือพงษ์ ลือนาม, สมศักดิ์ ภูเขาสุวรรณ และดวงกมล ปานรศทิพ ธรรมธาวัฒน์, 2557) ซึ่งการอบแห้งมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวิธีการนำความชื้นออกจากตัวผลผลิตที่ต้องการทำแห้ง วิธีการที่ดัดแปลงมาจากการนำผลผลิตทางเกษตรไปตากแดดธรรมชาตินั้นใช้หลักการอากาศไหลผ่านผลผลิตเพื่อระเหยความชื้นออกในส่วนของการอบแห้งใช้เวลาามากหรือน้อย (อัตราการอบแห้ง) ขึ้นอยู่กับอากาศอบแห้งและผลผลิต

2.1.1 บทบาทของอากาศอบแห้ง

ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรนั้นส่วนสำคัญประการแรกคือ อากาศที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งเป็นการระเหยความชื้นที่ผิวของผลิตผลทางเกษตรออกโดยผ่านตัวกลางคือ อากาศที่ใช้ออบแห้ง McPherson (1993) ได้กล่าวถึงอากาศโดยทั่วไปว่าประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ โดยที่อากาศเป็นแก๊สในอุดมคติและความดันของอากาศก็ประกอบไปด้วยความดันของอากาศแห้งกับความดันของไอน้ำเช่นกัน

$$m_{\text{air}} = m_a + m_v \quad (2.1)$$

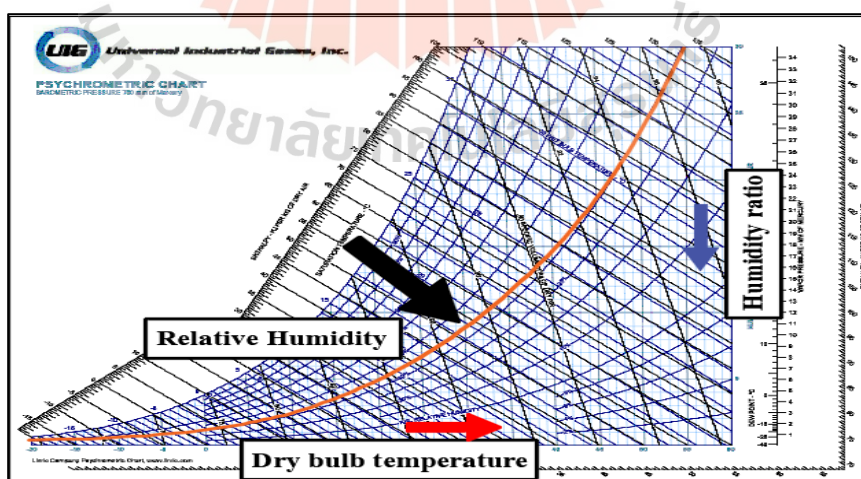
$$PV = m_{\text{air}} RT \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาสมการ Ideal gas Law เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมวลของตัวอากาศตามสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 โดยที่ค่า R เป็นคงที่ ปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สมีขนาดเท่ากันอธิบายได้ว่าที่สภาวะอากาศเดียวกันนั้น ความดันแปรผันตามมวลดังสมการที่ 2.3

$$P = P_a + P_v \quad (2.3)$$

โดยที่	m_{air}	คือ มวลของอากาศ, kg
	m_a	คือ มวลของอากาศแห้ง, kg
	m_v	คือ มวลเฉพาะส่วนของไอน้ำในอากาศ, kg
	P	คือ ความดันของอากาศ, kPa
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส, J/mol.K
	V	คือ ปริมาตรของอากาศ, m^3
	P_a	คือ ความดันของอากาศแห้ง, kPa
	P_v	คือ ความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำในอากาศ, kPa

พฤติกรรมของการระเหยน้ำจากผลิตผลอบแห้งนั้นเกิดขึ้นได้เมื่อความดัน หรือ มวลของน้ำในผลิตผลอบแห้งที่ผิวสัมผัสมีค่ามากกว่าความดันหรือมวลของไอน้ำเฉพาะส่วนในอากาศที่ใช้ออบแห้ง ผลต่างของความดันนี้ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวล หรือการระเหยของน้ำจากผลิตผลทางเกษตรออกไปยังอากาศที่ใช้ออบแห้ง สรุปได้ว่าสภาวะอากาศที่ใช้ออบแห้งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการอบแห้ง โดยการผลิตอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำนั้นสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ Psychrometric chart ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Psychrometric chart ที่มา : ดัดแปลงจาก Universal Industrial Gases, Inc. (1992)

พฤติกรรมของการระเหยน้ำจากผลิตผลอบแห้งนั้นเกิดขึ้นได้เมื่อความดัน หรือมวลของน้ำในผลิตผลอบแห้งที่ผิวสัมผัสมีค่ามากกว่าความดันหรือมวลของไอน้ำเฉพาะส่วนในอากาศที่ใช้ออบแห้ง ผลต่างของความดันนี้ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวล หรือการระเหยของน้ำจากผลิตผลทางเกษตรออกไปยังอากาศที่ใช้ออบแห้ง สรุปได้ว่าสภาวะอากาศที่ใช้ออบแห้งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการอบแห้ง โดยการผลิตอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำนั้นสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ Psychrometric chart ดังรูปที่ 2.1

2.1.2 พฤติกรรมการอบแห้ง

ผลิตผลทางการเกษตรทุกชนิดมีความชื้นอยู่ภายในตัว ซึ่งความชื้นนั้นเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง สามารถทำให้เกิดการเสียหายต่อผลิตผลได้ ในการอบแห้งนั้นอากาศอบแห้งที่ไหลผ่านได้เกิดการพาความร้อน และระเหยน้ำไปด้วยเป็นการลดปริมาณความชื้นของผลิตผลจนต่ำกว่า 15% wb ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ โดยสามารถแสดงถึงค่าความชื้นด้วยปริมาณความชื้น (Moisture content) ซึ่งใช้บ่งชี้ว่าผลิตผลนั้นมีปริมาณความชื้นหลงเหลืออยู่ในผลิตผลมากน้อยเพียงใด โดยปริมาณความชื้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก และปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Chakraverty and Singh, 2001)

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Moisture content wet basis) แสดงน้ำหนักของน้ำในผลิตผลเทียบกับปริมาณของน้ำหนักรวมของผลิตผล ค่าที่ได้มีสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าไม่เกิน 100 ความเปลี่ยนแปลงได้ง่ายนิยมใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างผลิตผลต่างชนิด หรือชนิดเดียวกันซึ่งแสดงอยู่ในรูปสัดส่วนได้ดังสมการที่ 2.4

$$MC_w = \frac{m - m_d}{m} \times 100 \quad (2.4)$$

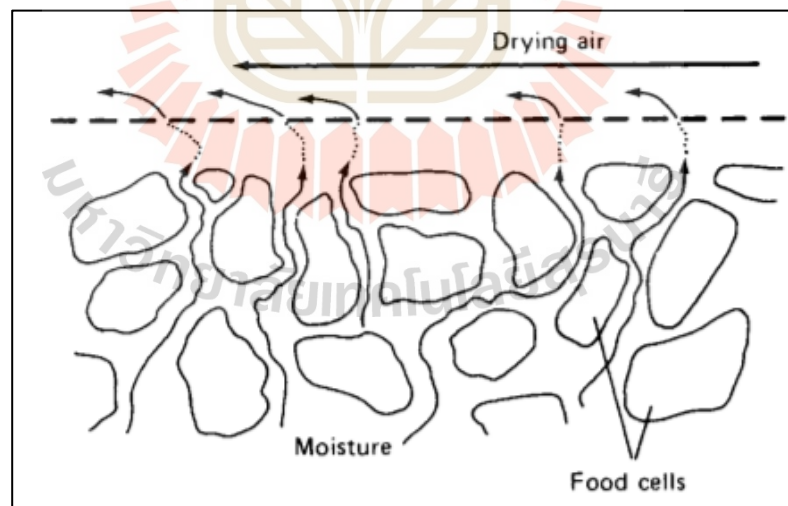
ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content dry basis) แสดงน้ำหนักของน้ำในผลิตผลเทียบกับปริมาณของน้ำหนักแห้งของผลิตผล ค่าที่ได้มีสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์แต่สามารถมีค่าสูงกว่า 100 ได้เนื่องจากใช้น้ำหนักแห้งเป็นตัวส่วน นิยมใช้ในเชิงการค้าเนื่องจากตัวส่วนหรือน้ำหนักแห้งมีค่าคงที่ตลอด ซึ่งแสดงอยู่ในรูปสัดส่วนได้ดังสมการที่ 2.5

$$MC_d = \frac{m - m_d}{m_d} \times 100 \quad (2.5)$$

ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในแต่ละช่วงโอมระหว่างการผลิตที่ต่างวิธีกัน โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) ในการเปรียบเทียบกัน เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้น ณ ขณะนั้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นดังสมการที่ 2.6

$$MR = \frac{MC_{wt} - MC_{eq}}{MC_{wi} - MC_{eq}} \quad (2.6)$$

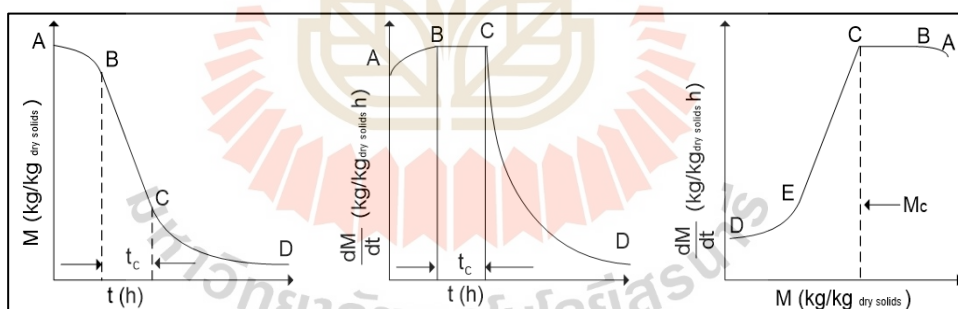
- โดยที่
- MC_w คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก, %wb
 - MC_d คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db
 - m คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์, kg
 - m_d คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้ง, kg_{dry}
 - MC_{wt} คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก ณ เวลาใด ๆ, %wb
 - MC_{wi} คือ ความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น, %wb
 - MC_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, %wb



รูปที่ 2.2 ความชื้นของผลผลิตทางเกษตรกับการอบแห้ง ที่มา : Fellows. (2000)

Fellows (2000) ได้อธิบายถึงการลดลงของปริมาณความชื้น หรือการระเหยน้ำออกนั้นเกิดขึ้นจากการที่อากาศที่ไหลผ่านพาหน้ำออกไปดังรูปที่ 2.2 เพราะฉะนั้นการระเหยจากการทำ

แห้งที่เกิดขึ้นเป็นการระเหยของน้ำบริเวณผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์นำมาทำการอบแห้ง ในระหว่างที่น้ำที่ผิวเกิดการระเหย ปริมาณน้ำบนผิวลดลง น้ำจากภายในจึงออกเคลื่อนที่มาแทนที่ แต่เนื่องจากต้องมีการเคลื่อนผ่านตัวของเซลล์ผลิตภัณฑ์จึงอาจทำให้น้ำจากภายในไหลออกมาช้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวของผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้งซึ่งส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง (Drying rate) หรืออัตราการลดลงของความชื้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทางเกษตรแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันออกไป บางชนิดมีรูพรุนมากกว่า น้ำจากภายในสามารถเคลื่อนที่ออกมาสู่พื้นผิวได้ง่ายกว่าอัตราการอบแห้งจึงคิดว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนตําน้ำสามารถไหลออกมาได้ยากอัตราการอบแห้งจึงมีค่าต่ำ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้อากาศอบแห้งเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ในสภาวะที่อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศที่สัมผัสผิวของผลิตภัณฑ์อบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ การแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นการพาความร้อน สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ตลอดกระบวนการอบแห้งได้ดังรูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์สามารถแสดงได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ กราฟแสดงปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์อบแห้งเปรียบเทียบกับเวลาในการอบแห้ง กราฟแสดงอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับเวลาในการอบแห้ง และกราฟแสดงอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์อบแห้ง แต่ละกราฟสามารถแบ่งช่วงการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาการอบแห้ง

ที่มา : เทวรัตน์ ทิพยวิมล (2552)

ช่วง A - B : ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งเมื่ออากาศอบแห้งเริ่มสัมผัสผิวของผลิตภัณฑ์ เริ่มเกิดการถ่ายเทความร้อน และเกิดการระเหยของน้ำบริเวณผิว ปริมาณความชื้นลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างผิวของผลิตภัณฑ์กับอากาศอบแห้ง

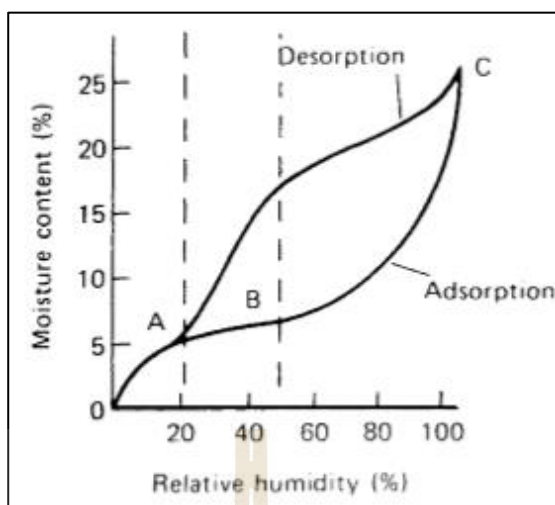
ช่วง B - C : ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ช่วงนี้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์แต่ยังคงมีความชื้นเนื่องจากน้ำจากภายในยังคงซึมออกมาแทนที่

บริเวณผิวแบบคงที่ ทำให้เกิดการระเหยด้วยอัตราการอบแห้งที่คงที่เช่นกัน โดยอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสผลิตภัณฑ์นั้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง

ช่วง C - D : ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling - rate period) เนื่องจากความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าช่วงเริ่มต้น ความชื้นภายในเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกจึงลดลง ณ จุด C ในรูปที่ 2.3 อัตราการอบแห้งจึงเริ่มลดลง โดยเรียกว่าปริมาณความชื้นที่อัตราการอบแห้งลดลงว่าปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) แต่กระบวนการอบแห้งยังคงดำเนินต่อไป อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์เริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C - E) เป็นช่วงที่ผิวของผลิตภัณฑ์แห้ง และอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากผิวสัมผัสแห้งแต่ยังคงมีการแพร่ความร้อนจากภายในออกมายังผิวเพราะฉะนั้นตัวแปรหลักที่ควบคุมอัตราการอบแห้งในช่วงนี้คือการแพร่ของความร้อนภายในออกมา ส่วนช่วงอัตราการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E - D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยลง ตัวของผลิตภัณฑ์กลายเป็นปัจจัยหลักของช่วงนี้แทน เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น ทั้งนี้การอบแห้งสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงถึงจุดความชื้นสมดุล และจากหลักการลดความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งจะเห็นได้ว่าหากต้องการเลือกใช้หรือต้องการออกแบบเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาอบแห้งก่อน

2.1.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)

การระเหยความชื้นของผลิตภัณฑ์อบแห้ง หรือการแลกเปลี่ยนมวลความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ (ปริมาณความชื้นและคุณสมบัติ) และอากาศอบแห้ง (อุณหภูมิและความชื้น) แต่ในขณะที่สถานะของอากาศอบแห้งคงตัว พฤติกรรมการลดลงของปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ใด ๆ มีพฤติกรรมการลดลงจนกระทั่งปริมาณความชื้นมีค่าเป็นปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, MC_{emc}) (สิริธร สุภาภรณ์, รตินันท์ เหลือมพล, สมนึก ชีรกุลพิสุทธ์ และอภิชาติ อาจนาศีวะ, 2559) ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของน้ำหนักตัว โดยช่วงของปริมาณความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ทางเกษตรแต่ละชนิด และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณนั้น (Chakravert et al., 2001) โดยสามารถพิจารณาพฤติกรรมการลดลงได้ด้วยกราฟซอร์พชัน ไอโซเทอรั่มอลของน้ำของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ซอร์พชันไอโซเทอร์ม ที่มา : Fellows (2000)

รูปที่ 2.4 เป็นกราฟแสดงถึงพฤติกรรมทั้ง 2 ลักษณะ ได้แก่ การคายความชื้นของผลผลิตเกษตร (Water desorption isotherm) และการดูดความชื้นกลับของผลิตผลแห้ง (Water adsorption isotherm) แบ่งออกเป็นเส้น 2 เส้นบนกราฟ กล่าวคือ ถ้านำผลิตผลสดที่มีปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง (สูงกว่าเส้น Desorption) ไปสัมผัสกับอากาศจะเกิดปรากฏการณ์คายความชื้นออกจนกระทั่งปริมาณความชื้นลดลงถึงเส้น Desorption และถ้านำผลิตผลแห้งที่มีปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง (ต่ำกว่าเส้น Adsorption) ไปสัมผัสกับอากาศจะเกิดปรากฏการณ์ดูดความชื้นกลับจนกระทั่งปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นถึงเส้น Adsorption แสดงถึงค่าปริมาณความชื้นสมดุลที่สภาวะอากาศนั้น ๆ

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งของผลิตผลอบแห้งโดยการใช้อากาศอบแห้งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และระบายความชื้นออกจากผลิตผลอบแห้ง โดยอัตราการอบแห้งนั้นแตกต่างกันออกไปตามสภาวะของการอบแห้ง (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2555) โดยสภาวะดังกล่าวหมายถึงคุณลักษณะของผลิตผลที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง รวมไปถึงสภาวะของอากาศอบแห้งในกระบวนการโดยปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพ หรือลักษณะโครงสร้างของผลิตผลอบแห้ง เนื่องจากผลิตผลทางเกษตรแต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกัน ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในออกมาที่ผิว ผลิตผลที่มีลักษณะเป็นรูพรุนทำการอบแห้งสามารถเคลื่อนความชื้นภายในออกมาได้ง่ายกว่าแบบเนื้อแน่น นอกจากนี้อากาศอบแห้งยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวเนื้อผลิตผลได้ง่ายอีกด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มพื้นที่สัมผัสของอากาศอบแห้งกับน้ำในผลิตผลอบแห้ง โดย Fatouh,

Metwally, Helali and Shedid (2006) ได้ทำการอบแห้งผลิตผลที่ต่างกันออกไปคือ พาร์สลีย์, ไบมินท์ และปอกระเจา ด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 55°C อัตราเร็วอากาศอบแห้ง 2.7 m/s และอัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวสัมผัส 28 kg/m² พบว่าเวลาในการอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่มีค่าเป็น 7, 7.5 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

2. ขนาดและรูปร่างของผลิตผล กล่าวคือที่ปริมาตรของผลิตผลอบแห้งเท่ากัน ผลิตผลอบแห้งที่มีพื้นที่สัมผัสกับอากาศอบแห้งมากกว่าจะมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นมีค่ามากกว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นออกจากผลิตผลอบแห้งมากกว่าเช่นกัน จากการทดลองของ Shi, Xue, Zhao, Li and Wang (2008) ได้ทำการอบแห้งปลาสิ่กุนที่สภาวะการอบแห้ง 20°C อัตราเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s พบว่าการอบแห้งของปลาสิ่กุนที่มีอัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวสัมผัส 1, 2, 4, 6 และ 8 kg/m² ใช้เวลาในการอบแห้งที่ต่างกันคือ 5.5, 8, 9, 14 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ

3. ปริมาณ และการจัดเรียงผลิตผลอบแห้ง เนื่องจากการจัดเรียงผลิตผลอบแห้งวางทับซ้อนกัน ส่งผลให้ผลิตผลอบแห้งที่โดนทับซ้อนอยู่ในสัมผัสกับอากาศอบแห้งได้ไม่เต็มที่ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงไปด้วย ดังนั้น การจัดเรียงที่เหมาะสมต่อการอบแห้งควรจัดให้กระจายกัน และไม่หนาแน่นเกินไปในแต่ละชั้นถาดของห้องอบแห้ง

4. อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิจากอุณหภูมิอบแห้งกับผลิตผลอบแห้งซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น และทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นอีกด้วย จุฑาศินี พรพุทศรี และสิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ (2555) ได้ทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานด้วยอุณหภูมิ 40°C, 45°C และ 50°C โดยใช้เวลาในการอบแห้งแห้ง 32, 24 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้อุณหภูมิมอบแห้งต้องคำนึงถึงผลิตผลอบแห้งที่จะนำมาอบแห้งเนื่องจากผลิตผลอบแห้งบางชนิดมีความต้านทานความร้อนต่ำจึงเสียหายได้ง่าย

5. ความชื้นของอากาศอบแห้ง อย่างที่ได้กล่าวไปว่าปริมาณความชื้นของอากาศร้อนแปรผันตามกับความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำของอากาศอบแห้ง เพราะฉะนั้นอากาศอบแห้งที่ดีควรมีความชื้นต่ำ ความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำต่ำ เพื่อให้มีผลต่างความดันระหว่างความชื้นในผลิตผลกับความชื้นในอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการระเหยได้ดี

6. ความดันบรรยากาศ เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศต่ำส่งผลให้จุดเดือดของน้ำลดลงไปด้วย ซึ่งส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง Artnaseaw, Theerakulpisut and Benjapiyaporn (2010) ได้ทำการปรับความดันบรรยากาศในการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ และอัตราการไหลอากาศเดียวกับพบว่าที่ความดันบรรยากาศต่ำกว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า

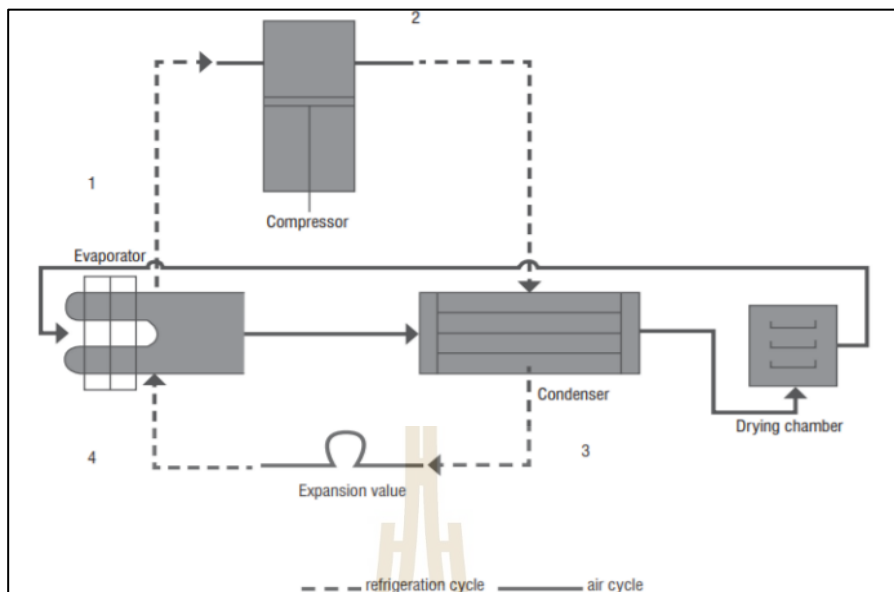
7. ความเร็วของอากาศอบแห้ง ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์อบแห้งในรูปแบบของการพาความร้อนที่มากกว่า (Jiji, 2009) โดย Putra and Ajiwiguna (2017) ได้นำวัสดุอบแห้งไปเข้าสู่อบที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากัน และทำการปรับอัตราเร็วของอากาศอบแห้งผลที่ได้คือ ที่อัตราเร็วของอากาศอบแห้งสูงกว่า สามารถลดมวลของน้ำจากวัสดุอบแห้งได้สูงกว่าด้วยระยะเวลาเท่ากัน

8. สมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์อบแห้ง โดยคุณสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งก็คือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่กระจายความร้อน ในส่วนของฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์อบแห้งก็คือ ความหนาแน่น และช่องว่างของอากาศในกองของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

จากปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการอบแห้งนั้น สามารถนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเครื่องอบแห้งได้หลากหลายวิธีการ โดยเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนระบบอัดไอที่ประยุกต์ใช้ปัจจัยดังกล่าวคือ มีการควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณความชื้นของอากาศอบแห้ง นอกจากนี้ ปัจจัยที่เหลือเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่เลือกใช้ในการอบแห้ง การจัดเรียง และสภาวะบรรยากาศที่ใช้อบแห้ง

2.2 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

หลักการของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนคือ การใช้อุปกรณ์ทางกลเพื่อผลิตอากาศอบแห้งให้มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งก่อนนำไประเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อลดข้อเสียของการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติที่ใช้เวลานาน สิ้นเปลืองพื้นที่เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปตากแดด อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมสภาพอากาศของการตากแห้งได้ นอกจากนี้ผลของการใช้ปั๊มความร้อนยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ จากรายงานของ เทวรัตน์ ทัพยวิมล และสมยศ เจริญอักษร (2551) พบว่าคุณภาพของไพลที่ได้หลังการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีคุณภาพทางด้านสีที่ดีกว่าการตากแห้งไพลด้วยวิธีการตากแดดอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของไพลก็ไม่แตกต่างจากไพลสด ดังนั้นการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนจึงสามารถที่จะยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้



รูปที่ 2.5 แผนผังของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบอัดไอ

ที่มา : Kivevele and Huan (2014)

ระบบการทำงานของปั๊มความร้อนที่พบเห็นอยู่แพร่หลายคือ ระบบอัดไอ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเส้นประแสดงถึงเส้นทางของสารทำความเย็น (Refrigeration cycle) ลักษณะทั่วไปของสารทำความเย็นนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันด้วยคอมเพรสเซอร์ (Compressor) และวาล์วลดความดัน (Expansion valve) ส่งผลให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะ อีกทั้งยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งจะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศที่เครื่องระเหย (Evaporator) และคอยล์ร้อน (Condenser) ในส่วนของเส้นทึบแสดงถึงการไหลของอากาศ (Air cycle) ที่ถูกบังคับทิศทางการไหลด้วยเครื่องเป่าลม (Blower) ให้ไหลเวียนผ่านห้องอบแห้ง (Drying chamber) เพื่อรับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ อากาศจึงมีปริมาณความชื้นสูงขึ้นแล้วถูกบังคับให้ไหลผ่านเครื่องระเหยความชื้นในอากาศจึงถูกควมแน่นออก อากาศที่เหลือจึงมีความชื้นต่ำกว่าปกติอากาศดังกล่าวถูกบังคับให้ไหลผ่านคอยล์ร้อน เพื่ออุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนนำไปเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อรับความชื้นอีกครั้ง และวนเวียนเป็นวัฏจักรต่อไป

การใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้งมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งทางธรรมชาติ ในเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง ฐานิตย์ เมธิยานนท์, สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ และธนิต สวัสดิ์เสวี (2541) ได้รายงานเกี่ยวกับการอบแห้งมะละกอแช่อิมด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนพบว่าคุณภาพด้านสีของมะละกอแช่อิมอบแห้งที่ได้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมีความสม่ำเสมอและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เช่นเดียวกับการรายงานของสุทธิศักดิ์

ภัทรสภาพรกุล (2543) ได้ทำการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน และทำการพัฒนาระบบ โดยเพิ่มชุดกลักความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านพลังงาน แล้วทำการอบแห้งเห็ดฟางสด พบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจากการทดสอบเทียบสีมาตรฐานพบว่ามีความสม่ำเสมออยู่ในค่ามาตรฐานเดียวกัน จากรายงานวิจัยข้างต้นเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนสามารถคงคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังช่วยลดข้อเสียของการอบแห้งโดยธรรมชาติเนื่องจากสามารถทำการอบแห้งได้โดยไม่ต้องสนใจสภาพอากาศ ในส่วนของประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งนั้น จากงานวิจัยของอัญชญา อุประกุล, จริญญา คนแรง และ ไพโรจน์ ค้างฉัตร (2558) พบว่า การอบแห้งผักตบชวาโดยใช้ระบบปั๊มความร้อนเข้ามาช่วย สามารถทำการอบแห้งผักตบชวาได้ในเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งถ้านำไปตากแห้งแบบธรรมชาติต้องใช้เวลาราว 4 วัน อีกทั้งยังสามารถทำการอบแห้งได้ทุกเวลาไม่ต้องคำนึงถึงสภาพอากาศ ซึ่งสมรรถนะของปั๊มความร้อนก็มีค่าสูงถึง 4.5 - 5.3 จากรายงานของฉัตรกร ทวีสุทธิ (2554) ได้แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะ (COP) ของปั๊มความร้อนในระบบอบแห้งมีสูงมากซึ่งมี COP สูงประมาณ 3 - 5 เนื่องจากระบบของปั๊มความร้อนนั้น ไม่มีการทิ้งพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอกของระบบ เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนจึงมีศักยภาพในการอบแห้งผัก ผลไม้ และสมุนไพร ที่ต้องการคงไว้ซึ่งคุณภาพและต้องการประหยัดพลังงานในการอบแห้ง ในด้านระยะเวลาของการอบแห้ง หรืออัตราการอบแห้งสามารถทำการอบแห้งโดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการนำไปตากแดด โดยอัตราการอบแห้งสามารถสูงได้ถึง 4 kg/kWh (Perera and Rahman, 1997) ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วยเช่น ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งขนาดของชิ้นผลิตภัณฑ์ สภาพของอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศและการจัดเรียงผลิตภัณฑ์ในชั้นอบแห้ง เป็นต้น ในส่วนของการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนได้ทำการแบ่งพิจารณาประสิทธิภาพเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน โดยพิจารณาได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ(Coefficient of performance, COP) ดังสมการที่ 2.7

$$\text{COP} = \frac{\text{Useful heat Output}}{\text{Power input}} = \frac{Q_{\text{in}}}{W_{\text{in}}} \quad (2.7)$$

2. ประสิทธิภาพทางด้าน การอบแห้ง สามารถพิจารณาได้ดังสมการต่อไปนี้

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) จะพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อบแห้งภายในระยะเวลาการอบแห้งหาได้จากสมการที่ 2.8 และการเปลี่ยนแปลงความชื้นก่อนและหลังการอบแห้งหาได้จากสมการที่ 2.9

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (2.8)$$

$$DR = \frac{MC_{di} - MC_{df}}{t} \quad (2.9)$$

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่สามารถทำการระเหยจากผลิตภัณฑ์แห้งต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหาได้จากสมการที่ 2.10

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{P_e} \quad (2.10)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์แห้ง ซึ่งจะพบว่าเป็นส่วนกลับของ SMER หาได้จากสมการที่ 2.11

$$SEC = \frac{3.6P_e}{m_i - m_f} \quad (2.11)$$

อัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate, MER) คือ ปริมาณน้ำที่ควบแน่นที่ระบบสามารถทำได้ในระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งหาได้จากสมการที่ 2.12

$$MER = \frac{m_{wc}}{t} \quad (2.12)$$

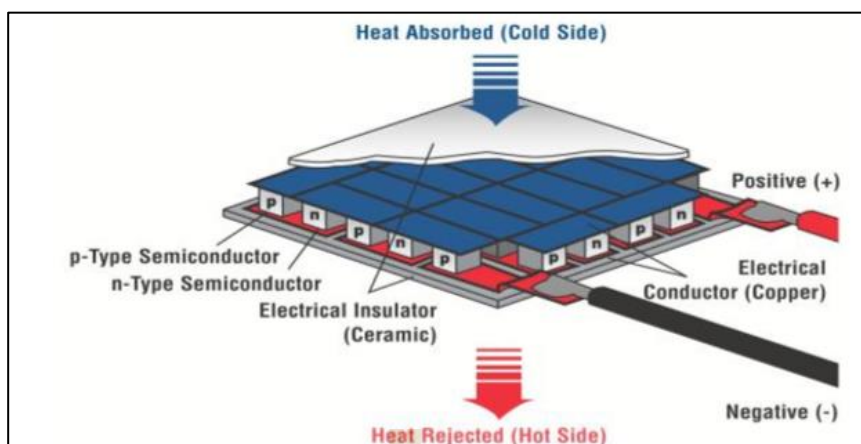
โดยที่	COP	คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
	Q_{in}	คือ ความร้อนที่อากาศได้รับ, W
	W_{in}	คือ พลังงานที่เครื่องอัดไอ, W
	DR	คือ อัตราการอบแห้ง, kg_{water}/h หรือ %db/h
	m_i	คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง, kg
	m_f	คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง, kg

m_{wc}	คือ น้ำหนักของผลิตผลน้ำควบแน่น, kg
MC_d	คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db
t	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h
SMER	คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg_{water}/kWh
P_e	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg_{water}
MER	คือ อัตราควบแน่นน้ำ, kg/h

ปั๊มความร้อนระบบอัดไอน้ำสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องอบแห้งได้ดี แต่พบว่ายังมีข้อเสียที่สำคัญคือ ปั๊มความร้อนระบบอัดไอน้ำต้องมีตัวกลางที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนในระบบ นั่นก็คือ สารทำความเย็น (Refrigerant) ซึ่งสามารถเกิดการรั่วไหลออกนอกระบบก่อให้เกิดปัญหาหมอกควัน และไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ระบบอัดไอน้ำต้องใช้อุปกรณ์ทางกลอย่างต่ำถึง 4 ชนิดในการทำงาน มีการติดตั้งที่ค่อนข้างซับซ้อน ถ้าหากตัวใดตัวหนึ่งชำรุดต้องทำการแยกระบบเพื่อเปลี่ยน และทำการติดตั้งใหม่ซึ่งเสียเวลาและทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์อุปกรณ์ชนิดใหม่ที่มีการสร้างความร้อน และยังสามารถก่อให้เกิดความเย็นได้อย่างใกล้เคียงกับปั๊มความร้อน ซึ่งก็คือ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

2.3 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module)

แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ลักษณะเป็นแผ่นบาง โดยทั่วไปมีขนาด $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ หนา 0.4 cm ซึ่งตัวแผ่นนี้สามารถก่อปรากฏการณ์ระหว่างเทอร์โมไดนามิกส์ที่ว่าด้วยความร้อน และพลังงานกับปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ว่าด้วยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน สร้างจากผลิตภัณฑ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ที่มา : Yadav, Singh and Gupta, (2014)

การทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งภายในตัวมีการใช้สารกึ่งตัวนำแบบพี-เอ็น (P-N type) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุที่ทำจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และทำให้มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิเกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง โดยเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N Type) จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขณะเดียวกันก็จะเกิดการดูดกลืนความร้อน (Absorbed heat) จากอีกด้านหนึ่งของสารกึ่งตัวนำไประบายความร้อนออก (Released heat) ที่ปลายของสารกึ่งตัวนำอีกด้านหนึ่งจึงทำให้ด้านหนึ่ง (คายความร้อน) และอีกด้านหนึ่งเกิดความเย็น (ดูดความร้อน) การนำไปใช้ประโยชน์สามารถประยุกต์ด้านร้อน หรือด้านเย็นไปใช้ได้หลากหลายรูปแบบแต่มีข้อสำคัญคือ ด้านเย็น หรือด้านดูดความร้อนนั้นสามารถทำความเย็นได้ก็ต่อเมื่อมีการระบายความร้อนออกจากด้านคายความร้อนได้ทันทีที่ ไม่เช่นนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จ่ายเข้าไปยังแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเกิดการสะสมพลังงานทำให้เกิดปรากฏการณ์คายความร้อนทั้ง 2 ด้านของแผ่น

ในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้หลากหลาย โดยปฐมพงศ์ จิโน, ธิราช ปิ่นทอง และโกเมน หมายมัน (2557) ได้ทำการสร้างตู้น้ำร้อนและเย็นขนาด 0.6 ลิตร โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งดัดแปลงมาจากตู้น้ำเย็นระบบอัดไอพบว่าสามารถลดอุณหภูมิน้ำเย็นด้วยอัตรา $0.25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อน $0.35^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ซึ่งประหยัดพลังงาน 467 W/h ในการประยุกต์เพื่อสร้างระบบระบายความร้อนให้แก่ซีพียูของเครื่องคอมพิวเตอร์ สมชาย มณีวรรณ (2549) ทำการศึกษาการโดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น Tianjinan model TEC1-12708 มีขนาด $4.0 \times 4.0 \times 0.4 \text{ cm}^3$ ในการระบายความร้อนซีพียู ซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ และระบายความร้อนด้วยสารทำงาน (เอทิลีนไกลคอล) แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลอยู่ที่ 2, 3 และ 4 V พบว่าที่อุณหภูมิการทำงานของซีพียู 55.8°C ในห้องไม่ปรับอากาศอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30°C ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศและระบายความร้อนด้วยเอทิลีนไกลคอล สามารถลดอุณหภูมิซีพียูได้ 4.3°C และ 11.5°C ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก 4 V และในห้องปรับอากาศ อุณหภูมิแวดล้อม 25°C สามารถลดอุณหภูมิซีพียูลงได้ 15.8°C และ 15.5°C เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 2 V โดยมีค่าความสามารถในการทำ ความเย็นและสมรรถนะของระบบเท่ากับ 22.3 W และ 1.3 ที่ 30°C และ 17.7 W และ 1.6 ที่ 25°C ตามลำดับ นอกจากนี้ในการประยุกต์กับอุปกรณ์ป้องกันตัวอย่างหมวกนิรภัยโดย Cao, Han and Huo (2017) ได้ทำการติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อใช้ระบายความร้อนให้แก่หมวกนิรภัยสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งสามารถทำอุณหภูมิได้ที่ 24°C ด้วยการให้พลังงานแค่ 6 W

เห็นได้ว่าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างความเย็นได้โดยการทิ้งความร้อนซึ่งหลักการคล้ายกับปั๊มความร้อน เพราะฉะนั้นในปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกแทนปั๊มความร้อน He, Zhong, Cai, Liu and Zhao (2017) ได้สร้างกล่องแช่เย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับใช้เก็บอุปกรณ์ทางการแพทย์ ผลการทดลองที่ได้คือ ได้กล่องแช่เย็นที่สามารถทำความเย็นได้ตามที่ผู้วิจัยต้องการ อีกทั้งยังประหยัดพลังงานอีกด้วย ในงานวิจัยที่คล้ายกันแต่เป็นการทำตู้แช่น้ำเย็นของ Enescu, Ciocia, Mazza and Russo (2017) ซึ่งเป็นตู้แช่ที่สามารถบรรจุน้ำขนาด 1 ลิตรได้ถึง 7 ขวด ผู้วิจัยกล่าวว่าสามารถติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกได้ง่ายกว่าปั๊มความร้อน นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ได้ถึง 8°C นอกจากนี้ในการใช้งานแทนปั๊มความร้อนที่ปกติแล้วนิยมใช้ในเครื่องปรับอากาศ ตัวของเทอร์โมอิเล็กทริกก็ได้ถูกนำมาใช้ในเครื่องปรับอากาศเช่นกัน โดย Yadav et al (2014) ได้นำแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาสร้างเป็นเครื่องปรับอากาศแทนการใช้ระบบอัดไอโดยใช้โซลาร์เซลล์เป็นตัวรับพลังงานจากดวงอาทิตย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้เป็นเครื่องปรับอากาศชนิดพกพาได้

การทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกนอกจากใช้ในการปรับอากาศแล้ว ยังสามารถใช้ในการควบแน่นความชื้นออกจากอากาศได้อีกด้วย Al-Madhhachi and Min (2017) ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถด้านเย็นที่สามารถกลั่นน้ำจากอากาศได้โดยติดตั้งซิงค์ความร้อนทั้งสองด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ทำการระบายความร้อนออกจากด้านร้อนของแผ่น และให้อากาศไหลผ่านด้านเย็นพบว่าเกิดการกลั่นตัวของความชื้นในอากาศ Wongpaisarnkit, Treemnuak and Treemnuak (2018) ได้ทำการทดสอบให้อากาศไหลผ่านแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดตั้งครีบน้ำร้อนด้วยอัตราไหลอากาศด้านร้อน 0.0229 kg/s และด้านเย็น 0.0089 kg/s ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแก่ TEC12710 ด้วยแรงดัน 6 V 3.5 A พบว่า เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่ด้านเย็นของแผ่น

เทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีอัตราการควบแน่นของความชื้นในอากาศได้ที่ $0.016 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ และพบว่า จะต้องระบายความร้อนออกจากด้านร้อนให้รวดเร็วเพียงพอระบบจึงจะทำงานได้ดีและต่อเนื่อง นอกจากนี้ อินธิเทพ พึ่งเมือง (2559) ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกมาทำการกลั่นน้ำเช่นเดียวกัน น้ำที่ได้อยู่ที่ 8.33 g/h โดยได้กล่าวไว้ว่าไม่ควรให้อัตราไหลอากาศด้านเย็นสูง เนื่องจากระบบจะลด อุณหภูมิอากาศไม่ทันทำให้อุณหภูมิจากอากาศต่ำไม่ถึงจุดน้ำค้างและไม่เกิดการกลั่นตัวของหยดน้ำ

2.4 สรุปแนวคิดในการดำเนินการ

ในเนื้อหาของบทที่ 2 นั้นกล่าวถึงพฤติกรรมการอบแห้ง และปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง ซึ่งเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งที่สร้างจากปั๊มความร้อนระบบอัดไอได้ออกแบบตามแนวทางในการเพิ่มคุณภาพของอากาศอบแห้งคือ ทำการลดความชื้นของอากาศโดยการควบแน่น แล้วนำอากาศไปอุ่น เพื่อให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลง แต่เนื่องจากปั๊มความร้อนระบบอัดไอยังพบข้อเสียคือ เป็นระบบที่ซับซ้อน ติดตั้งยาก และไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นในการลดความชื้นของอากาศ และด้านร้อนใช้ในการอุ่นอากาศ (Preheating) แต่เนื่องจากอุณหภูมิจากด้านร้อนอาจไม่สูงพอที่จะอุ่นอากาศให้ร้อนถึงค่าที่ต้องการ ได้จึงติดตั้งขดลวดความร้อนเพื่อช่วยเสริมการอุ่นอากาศร่วมกัน และจากความสามารถที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นทำได้ส่งผลให้ได้อากาศที่มีความชื้นต่ำอีกทั้งการอุ่นอากาศด้วยด้านร้อนยังสามารถลดภาระการทำงานของขดลวดความร้อนได้อีกด้วย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับการดำเนินการวิจัยสร้างเครื่องต้นแบบ และทดสอบการอบแห้งด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก รวมไปถึงผลิตผลที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

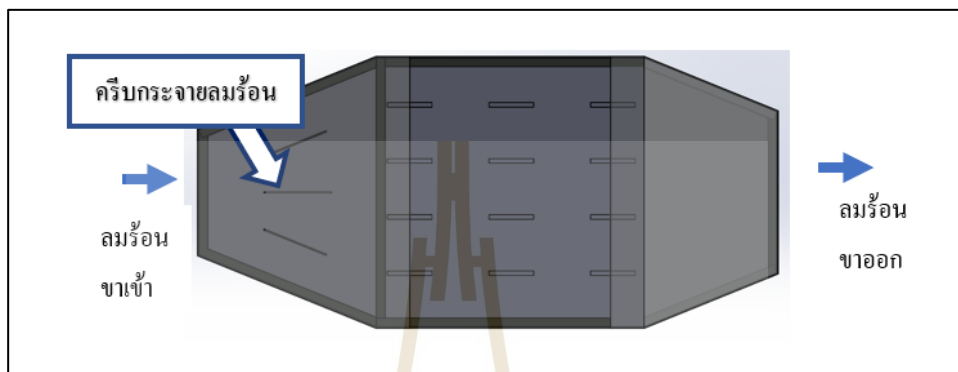
1. เครื่องอบแห้งโดยใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module, TEC) ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าโดยการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ได้แสดงรายละเอียดไว้ในส่วนของวิธีการ
2. ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven) FRANCE ETUVES รุ่น XU058 ใช้สำหรับการหาน้ำหนักแห้งของผลิตผลเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณความชื้น
3. อุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบเส้นลวดความร้อน (Hot wire anemometer)
4. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นรุ่น DHT22 ยี่ห้อ Shenzhen ใช้ร่วมกับบอร์ด Arduino รุ่น UNO R3 เป็นแหล่งจ่ายพลังงานและเก็บข้อมูล
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลยี่ห้อ Sartorius รุ่น 85A-32025-CW ความละเอียด 0.01 กรัม สำหรับชั่งน้ำหนักผลิตผลที่ใช้ในการทดสอบ
6. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้ (DC Power supply)
7. อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter) สำหรับวัดพลังงานที่ใช้ขณะทดสอบการอบแห้ง
8. ฟริกซ์หนูแดงพันธุ์ซูเปอร์ฮอต เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทดลองการอบแห้ง

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น

ในส่วนของเครื่องอบแห้งที่ออกแบบ ต้องการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น (TEC) สำหรับการควบคุมเพื่อลดความชื้นในอากาศ และ Preheating เพื่อแบ่งเบาภาระของฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้มีการดำเนินการดังนี้

3.2.1 ห้องอบแห้ง

ทำการสร้างห้องอบแห้งที่มีความกว้าง 0.6 m ความสูง 0.6 m และความลึก 0.6 m ซึ่งมีปริมาตรประมาณ 216 ลิตร (เฉพาะส่วนสำหรับการวางผลผลิตสำหรับการอบแห้ง) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบของห้องอบแห้ง

ผนังห้องอบแห้งใช้เป็นเหล็กแผ่นอบสังกะสี และทำการบุฉนวนกันความร้อนไว้ภายในระหว่างผนังด้านนอกและผนังห้องอบแห้งชั้นใน มีฐานรองสำหรับวางถาดผลิตผลอบแห้งทั้งหมด 4 ชั้น แต่ละชั้นมีระยะความสูงห่างกันที่ 12 cm ถาดที่ใช้สำหรับการวางผลิตผลอบแห้งใช้ทั้งหมด 4 ถาด ขนาด 50 cm × 50 cm มีการบังคับทิศทางเข้าและออกของลมร้อนอย่างละทาง ติดตั้งครีบกกระจายลมร้อนสำหรับบังคับทิศทางของลมร้อนให้ไหลไปยังแต่ละชั้น

3.2.2 ปริมาณฟริกซ์หนูแดงสำหรับห้องอบแห้ง

สำหรับปริมาณฟริกซ์หนูแดงที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละครั้งนั้น เบื้องต้นทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณด้วยค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ซึ่งฟริกซ์หนูแดงที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้น 73%wb, มีค่า Bulk density อยู่ที่ประมาณ 330 kg/m³ เมื่อกำหนดให้ฟริกซ์หนูแดงที่วางบนถาดมีความสูง 1 cm

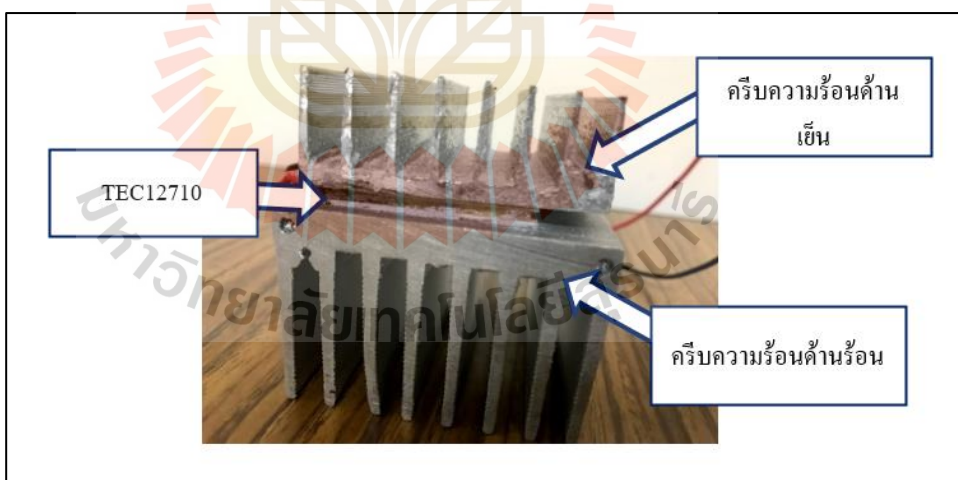
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณฟริกซ์หนูแดงต่อ 1 ถาด} &= \text{bulk density} \times \text{พื้นที่ถาด} \times \text{ความสูงของฟริก} \\ &= 330 \text{ kg/m}^3 \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \\ &= 0.825 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณฟริกซ์หนูแดงต่อ 4 ถาด} &= 0.825 \text{ kg} \times 4 \\ &= 3.3 \text{ kg} \end{aligned}$$

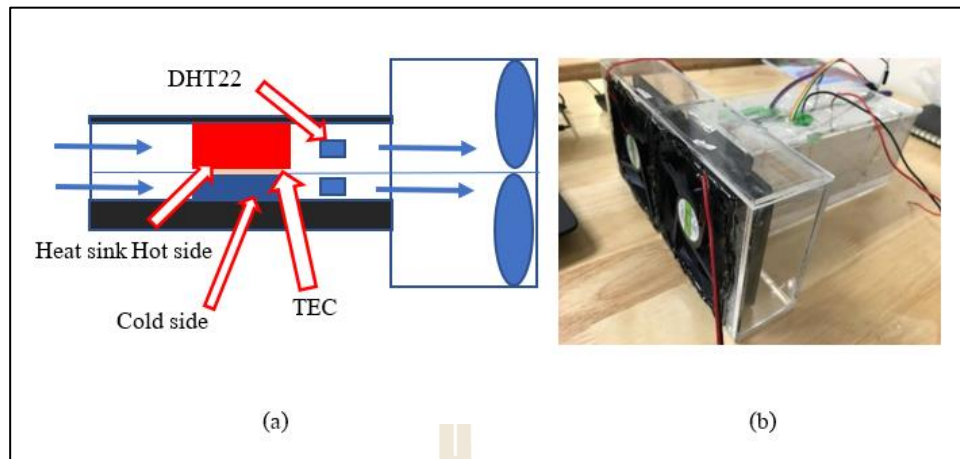
เพราะฉะนั้นใช้ฟริกซีหนูแดงสำหรับทดสอบการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งที่สร้างขึ้น
ต่อครั้งประมาณ 3.5 kg

3.2.3 การทดสอบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกชั้นต้น

ก่อนทำการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้น หรือตู้เทอร์โมอิเล็กทริกนั้น
ได้ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยได้ทำการติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC-12710 ของบริษัท Hebei
I.T. Co., Ltd ประเทศจีน มีขนาด $4 \times 4 \text{ cm}^2$ หนา 0.4 cm พร้อมติดตั้งครีบริความร้อนทั้งด้านร้อนและ
ด้านเย็นด้วยซิลิโคนยี่ห้อ Thermal Grease Gelid GC Extreme โดยมีค่าคงที่การนำความร้อนอยู่ที่
8.5 W/mK ในส่วนครีบริความร้อนด้านร้อนมีขนาด (กว้าง \times ยาว \times ลึก) 6.6 cm \times 6.6 cm \times 4.0 cm
ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าครีบริความร้อนด้านเย็นที่มีขนาด 5.3 cm \times 5.3 cm \times 2.0 cm ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจาก
ต้องการระบายความร้อนออกจากด้านร้อนให้ทันก่อนเกิดการอื่นความร้อนทำให้เกิดความร้อนขึ้น
ทั้ง 2 ด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ในตู้อะคริลิกใสหนา 4 mm เป็นลักษณะท่อลมแบ่งเป็น
2 ทางออกจากกันสำหรับฝั่งร้อนและฝั่งเย็นซึ่งมีพัดลม DC 2.5 \times 2.5 นิ้ว รุ่น FB602012M DC12V
0.16A ติดตั้งแบบดูดอากาศออกทั้งด้านร้อนและเย็น นอกจากนี้ยังใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้น
สัมพัทธ์และอุณหภูมิในระบบด้วย DHT22 ยี่ห้อ Shenzhen ใช้ร่วมกับบอร์ด Arduino รุ่น UNO R3
เป็นแหล่งจ่ายพลังงานและเก็บข้อมูลดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการติดตั้งครีบริความร้อนทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกเบื้องต้น (a) แบบจำลอง (b) แบบจริงพร้อมติดตั้ง
ฉนวนความร้อน

ในการทดสอบเบื้องต้นได้ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าแก่เทอร์โมอิเล็กทริกและพัด
ลมกระแสตรงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการทดสอบขั้นต้น

Factors and the various of experiment run					
Power input for TEC (V)	3	6	9	12	16
Power input for hot side fan (V)	3	4.5	6	9	12
and air flow rate made (m^3/s)	0.0094	0.0127	0.0145	0.0178	0.0202
Power input for cold side fan (V)	3	4.5	6	9	12
and air flow rate made (m^3/s)	0.006	0.0079	0.0091	0.0115	0.0133

จากการทดลองเพื่อคุณสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละสภาวะ
การทดลองได้ค่าอุณหภูมิด้านร้อน อัตราการควบแน่นความชื้น ปริมาณความร้อน และค่า COP
ดังตารางที่ 3.2

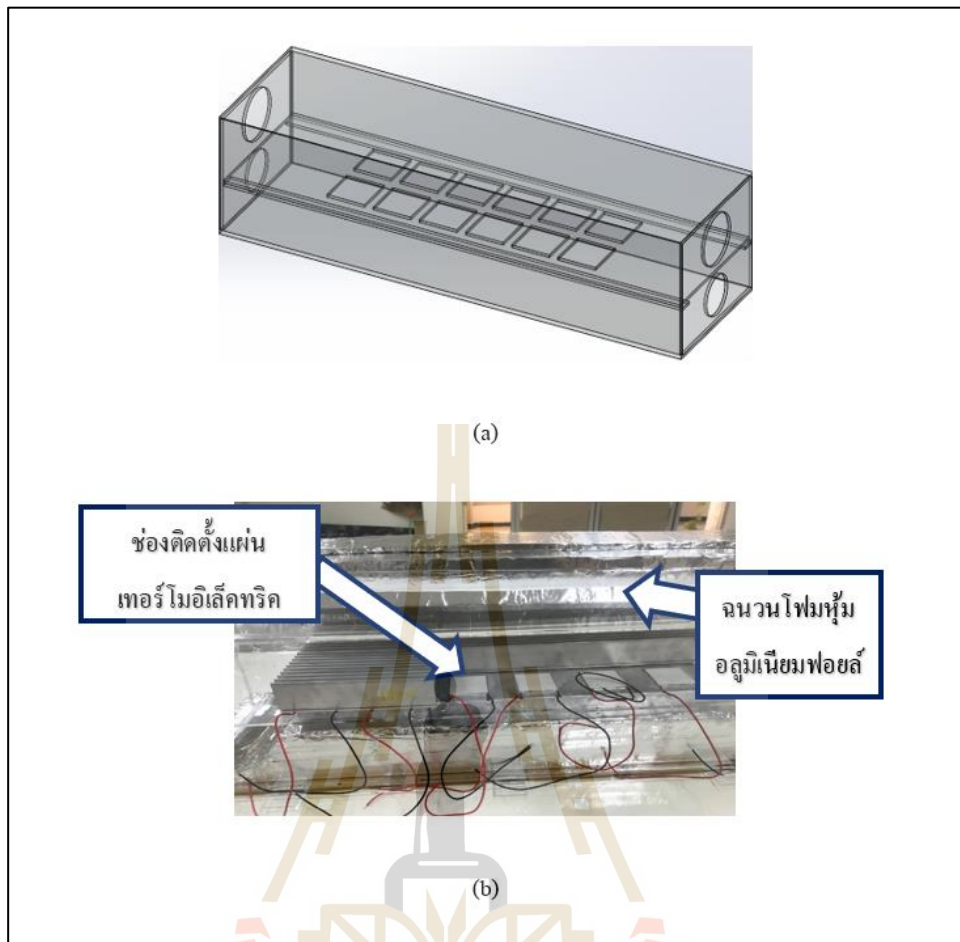
ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองที่ดีที่สุดของแต่ละค่าสมรรถนะ

Factor	Results and Experiment runs			
	Best result	TEC	Hot side air flow	Cold side air flow
Hot side temperature	52.3 °C	16 V, 8.5 A	0.0094 m ³ /s	0.006 m ³ /s
Moisture extraction rate	0.016 kg _{water} /h	6 V, 3.5 A	0.0202 m ³ /s	0.0079 m ³ /s
Q _h	160 W	16 V, 8.5 A	0.0145 m ³ /s	0.006 m ³ /s
Q _c	24 W	6 V, 3.5 A	0.0202 m ³ /s	0.0079 m ³ /s
COP	1.14	6 V, 3.5 A	0.0202 m ³ /s	0.0079 m ³ /s

จากการทดลองพบว่าการระบายความร้อนออกจากตัวเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเรื่องสำคัญเมื่อต้องการให้ด้านเย็นสามารถสร้างความเย็นได้ เนื่องจากการระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกไม่ทันการจะเกิดความร้อนสะสมทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกร้อนทั้ง 2 ด้าน เพราะฉะนั้นจากตารางที่ 3.2 จึงเห็นได้ว่าเกิดการควบแน่นน้ำด้วยอัตรา 0.016 kg_{water}/h (เกิดเมื่ออากาศที่ไปสัมผัสฝั่งเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิต่ำถึงจุดน้ำค้าง) ซึ่งเกิดได้ดีเมื่อทำการจ่ายพลังงานให้แก่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยแรงดัน 6 V และจ่ายแรงดันให้แก่พัดลมด้านร้อน 12 V หรืออัตราการไหลของอากาศด้านร้อนเป็น 0.0202 m³/s ที่เป็นค่าสูงสุดในการทดลองจึงได้ใช้เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นที่ติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

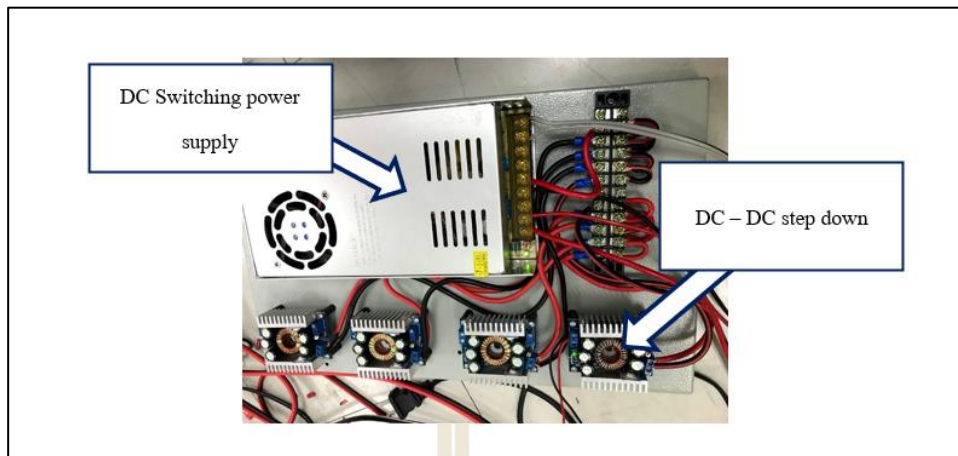
3.2.4 เครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นและฮีตเตอร์ไฟฟ้า

เบื้องต้นได้ทำการสร้างเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น เป็นตู้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยผนังตู้ใช้เป็นแผ่นอะคริลิกใสหนา 4 mm มีขนาดความกว้าง 70 cm ความสูง 18.2 cm และความลึก 20.8 cm ภายในมีแผ่นอะคริลิกเพื่อกั้นตู้อะคริลิกออกเป็น 2 ชั้นแบ่งแยกออกจากกัน (สำหรับแยกด้านร้อนกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก) โดยแผ่นกั้นนี้ได้ทำการเจาะรูขนาด 4 cm × 4 cm สำหรับใส่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ติดตั้งโฟมที่ทำการหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ สำหรับเป็นฉนวนกันความร้อนไว้ภายในเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น อีกทั้งยังใช้เป็นฐานรองให้แก่ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดตั้งตัวระบายความร้อนดังรูปที่ 3.4 สัมพัทธ์และอุณหภูมิในระบบด้วย DHT22 ยี่ห้อ Shenzhen ใช้ร่วมกับบอร์ด Arduino รุ่น UNO R3 เป็นแหล่งจ่ายพลังงานและเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 เครื่องอุ่นอากาศชนิด (a) แบบจำลอง (b) แบบจริงพร้อมติดตั้งฉนวนความร้อน

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างความร้อนและความเย็นแก่อุปกรณ์ โดยใช้ตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วย DC Switching power supply 12 VDC 30 A รุ่น S - 360 - 12 พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ DC – DC step down สำหรับการปรับควบคุมแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดถูกติดตั้งไว้ในตู้ไฟฟ้า การติดตั้งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น

ตารางที่ 3.3 ผลของการปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก

Volt of TEC	Hot side			Cold side		
	Speed	Mass flow rate	Heat	Speed	Mass flow rate	Moisture extraction rate
V	m/s	kg _{air} /s	W	m/s	kg _{air} /s	kg _{water} /h
5.5	8	0.023	16	2	0.0058	0.017
5.8	8	0.023	130	2	0.0058	0.014
6	8	0.023	150	2	0.0058	0.014
6.3	8	0.023	120	2	0.0058	0.02
6.5	8	0.023	220	2	0.0058	0.013

ทำการทดสอบเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นที่สร้างขึ้น โดยทำการควบคุมอัตราการไหลผ่านด้านร้อน 0.023 kg_{air}/s (อัตราเร็ว 8 m/s) และผ่านด้านเย็น 0.0058 kg_{air}/s (อัตราเร็ว 2 m/s) ให้ไหลผ่านเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ในส่วนของอัตราไหลอากาศข้างต้นถูกแบ่งเป็นด้านร้อน 80% และด้านเย็น 20% ตามวิธีการเชิงตัวเลขของเทอร์ตัน ทิพยวิมล (2545) เนื่องจากถ้าอากาศไหลผ่านด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยอัตราการไหลสูง อุณหภูมิอากาศไม่อาจลดลงถึงจุดน้ำค้างทำให้ไม่เกิดการควบแน่นของความชื้นในอากาศ ประกอบกับอากาศที่เย็นตัวลงปริมาณมากจะทำให้การอุ่นอากาศให้อุณหภูมิสูงถึงค่าที่ต้องการได้ยาก เกิดความสิ้นเปลือง

พลังงานสูง และเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ 6.3 V ซึ่งสามารถควบคุมความชื้นได้มากที่สุดด้วยอัตราการควบคุม 0.02 kg_{water}/h ในส่วนของด้านร้อนสามารถอุ่นอากาศโดยมีพลังงานความร้อน อยู่ที่ 0.12 kW แต่ในห้องอบแห้งต้องการใช้อุณหภูมิที่ 54°C เมื่อกำหนดให้สถานะของอากาศที่จังหวัดนครราชสีมา, ประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยที่ 32°C, 80%RH สามารถคำนวณพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิได้จากสมการที่ 3.1

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (3.1)$$

เมื่อสถานะอากาศที่ 1 อยู่ที่ 32°C, 80%RH มีค่า h_1 เท่ากับ 94.569 kJ/kg_{air} และสถานะอากาศที่ 2 ทำการเพิ่มความชื้นโดยความชื้นคงที่ถึงอุณหภูมิ 54°C มีค่า h_2 เท่ากับ 117.667 kJ/kg_{air}

$$\begin{aligned} \dot{Q}_h &= 0.0288 (117.667 - 94.569) \text{ kW} \\ &= 0.665 \text{ kW} \end{aligned}$$

ในการอุ่นอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิดังกล่าวต้องใช้ความร้อนจากการคำนวณอยู่ที่ 665 W เนื่องจากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกจากการทดลองเบื้องต้นที่แรงดันไฟฟ้า 6.3 V สามารถทำความร้อนที่ 120 W ดังนั้นขดลวดไฟฟ้า หรือฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะต้องใช้พลังงานในการอุ่นอากาศ ($\dot{Q}_{\text{heat up}}$) เท่ากับ

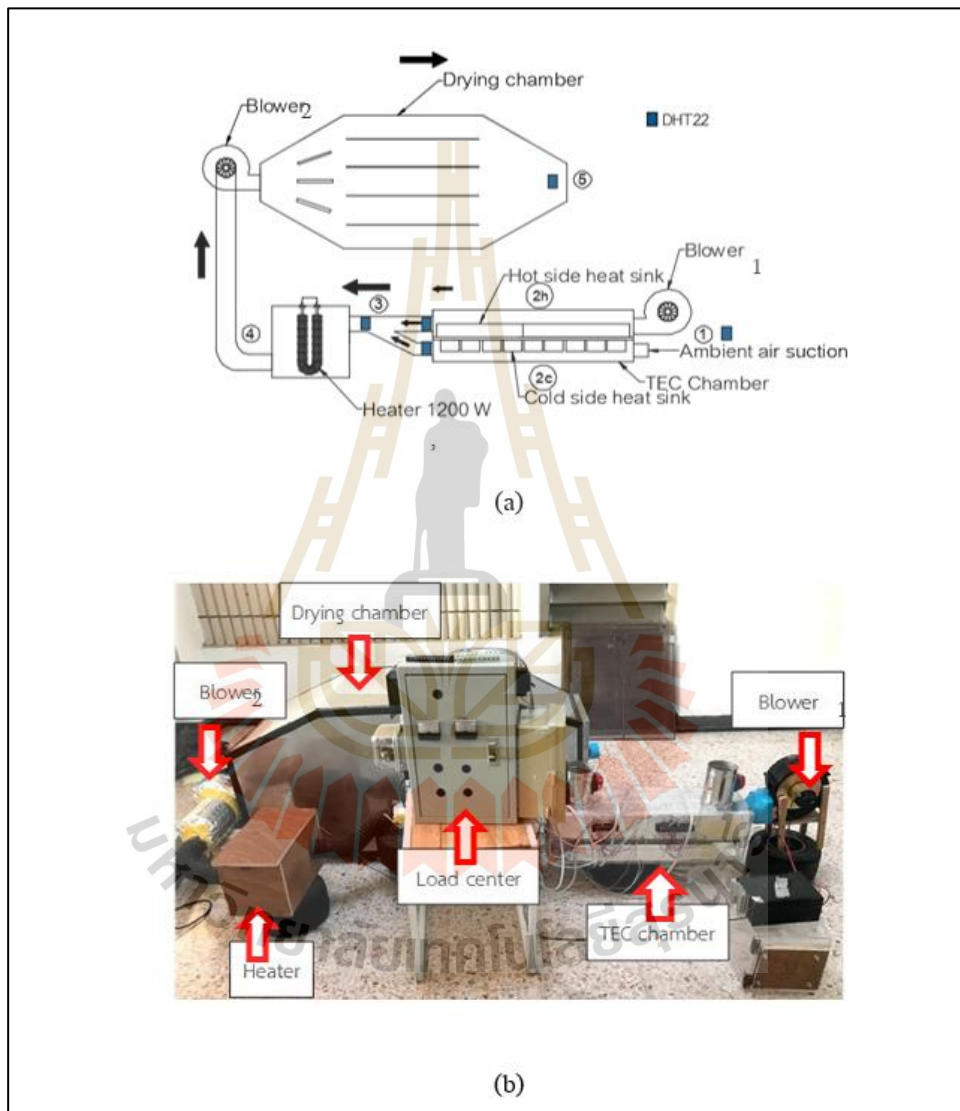
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{heat up}} &= 665 - 120 \text{ W} \\ &= 545 \text{ W} \end{aligned}$$

ในการอุ่นอากาศโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้ได้อุณหภูมิ 54°C ต้องการความร้อนเพิ่ม 545 W จึงต้องติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งเพิ่มความชื้นเพิ่ม ซึ่งขนาดที่เลือกใช้สำหรับฮีตเตอร์ไฟฟ้าอยู่ที่ 1,200 W สำหรับการสร้างอากาศอบแห้ง และติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบ PID คอนโทรล เพื่อควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้คงที่ตลอดการทดสอบ

3.2.5 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบ

เครื่องอบแห้งด้วยเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นร่วมกับขดลวดไฟฟ้าต้นแบบได้ทำการติดตั้งระบบสร้างอากาศอบแห้งเป็น 2 ส่วนได้แก่ เครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น (TEC Chamber) และฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater 1,200 W) การทำงานของระบบเริ่มต้นจากอากาศจากสิ่งแวดล้อม (ตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 3.6a) ถูกนำเข้าสู่เครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นซึ่งมีการแบ่งอากาศออกเป็น 2 เส้นทางแยกด้านเย็นติดกันกับด้านร้อนที่แยกช่องทางกัน สำหรับด้านเย็นควบคุมอัตราการไหลอากาศที่ 0.0058 kg_{air}/s ไหลผ่านครีบบระบายความร้อนด้านเย็น (ตำแหน่ง 2c ในรูปที่ 3.6a) เพื่อลด

อุณหภูมิอากาศให้ถึงจุดน้ำค้างแล้วเกิดการควบแน่นความชื้นบางส่วนออกจากอากาศอบแห้ง อีกเส้นทางหนึ่งอากาศไหลผ่านครีบบระบายความร้อน (ตำแหน่ง 2h ในรูปที่ 3.6a) ด้านร้อนด้วย อัตราการไหล $0.023 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{s}$ เพื่อทำการระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกและทำให้เกิดการทำความเย็นในด้านเย็น นอกจากนี้อากาศที่ผ่านตำแหน่ง 2h จะถูกอุ่นขึ้นต้น (Preheating) อีกด้วย

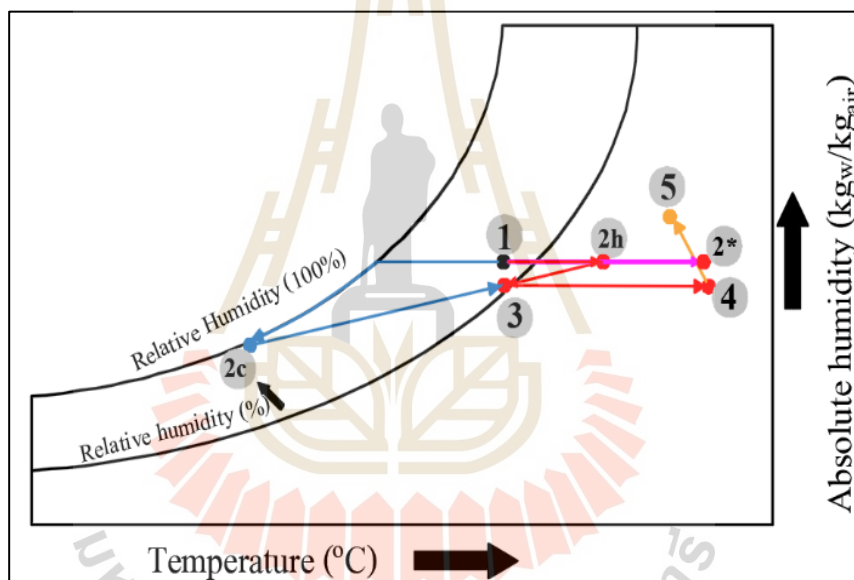


รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเครื่องอบแห้งพร้อมเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น
(a) แบบจำลอง (b) เครื่องจริง

เมื่อผ่านเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นแล้ว อากาศทั้ง 2 เส้นทางจะไหลมารวมกันอีกครั้ง (ตำแหน่ง 3 ในรูปที่ 3.6a) ก่อนนำไปผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1,200 W ที่ควบคุมการทำงานด้วย

เทอร์โมสตัตอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Linking รุ่น LT400 ซึ่งตั้งค่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเอาไว้ที่ 54°C ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบจากความร้อนต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบอบแห้ง (Marnoto, Sulistyowatim, Mahreni and Syahri, 2012) นอกจากนี้ยังทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับความชื้นรุ่น DHT 22 ยี่ห้อ Shenzhen ทั้งหมด 5 จุด ทำงานร่วมกับ Arduino รุ่น UNO R3 ในการเก็บบันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาทีตลอดการทดสอบ ในการติดตั้งและจัดวางอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบทั้งแบบจำลอง และรูปเครื่องอบแห้งจริงได้แสดงดังรูปที่ 3.6 a และ b ตามลำดับ

กระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์ในแต่ละตำแหน่งของเครื่องอบแห้งต้นแบบนั้นสามารถอธิบายถึงผลของการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นได้ด้วย Psychrometric chart และได้ทำการแสดงข้อมูลแต่ละตำแหน่งของกระบวนการดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สภาพอากาศในแต่ละตำแหน่งของชุดเครื่องอบแห้ง

สถานะของอากาศจากรูปที่ 3.7 กระบวนการของอากาศอบแห้งเริ่มจากอากาศแวดล้อมภายนอก (ตำแหน่งที่ 1) ถูกป้อนเข้าสู่ระบบให้ไหลผ่านครีบริบายความร้อนด้านร้อนของ TEC module (ตำแหน่ง 2h) ด้วยโบลเวอร์ไฟฟ้าแบบปรับอัตราการไหลได้ (Blower 1 ในรูป 3.6a) กระบวนการจาก 1 - 2h นี้เป็นกระบวนการเพิ่มความร้อนแบบอัตราส่วนความชื้นคงที่ ในขณะที่เดียวกัน อากาศจากสิ่งแวดล้อมจะถูกดูดเข้าสู่ระบบและไหลผ่านครีบริบายความร้อนด้านเย็นของ TEC module (ตำแหน่ง 2c) เนื่องจากผลของการเกิดความดันลดในท่อจากผลของอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในช่วงตำแหน่ง 2h ถึง 3 ประกอบกับมีการติดตั้งโบลเวอร์ตัวที่ 2

(Blower 2 ในรูป 3.6a) เพื่อใช้ส่งอากาศเข้าห้องอบแห้งอีกด้วย ที่ปลายทางเข้า (Ambient air suction) มีการติดแผ่นกั้นเพื่อควบคุมอัตราการไหลเข้าจากตำแหน่ง 1 ถึง 2c ให้คงที่ตามต้องการ กระบวนการจาก 1 - 2c นี้ เป็นการลดอุณหภูมิจนถึงจุดควบแน่น ทำให้ความชื้นในอากาศเปลี่ยนสถานะเป็นหยดของเหลวและแยกตัวออกจากอากาศ จากนั้นอากาศจากตำแหน่ง 2h และ 2c จะไหลเข้าผสมกันตามกระบวนการผสมอากาศที่ตำแหน่ง 3 เกิดเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นและความชื้นลดลง ก่อนที่จะไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่ออุ่นอากาศจนมีอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 4 ถึงค่าที่ต้องการ กระบวนการจาก 3 - 4 จึงเป็นการให้ความร้อนแบบอัตราส่วนความชื้นคงที่ อากาศที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งก่อนจะไหลออกจากระบบที่ตำแหน่ง 5 กระบวนการจาก 4 - 5 จึงเป็นการเพิ่มความชื้นเข้าสู่อากาศตามกระบวนการอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ สำหรับระบบที่ตัดอุปกรณ์อุ่นอากาศขึ้นต้นด้วย TEC module ออก ก็จะใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวในการเพิ่มอุณหภูมิ แล้วนำไปผ่านผลผลิตสำหรับการอบแห้งตามกระบวนการบน Psychrometric chart จะดำเนินการตามเส้น 1 - 2* - 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.7

การควบแน่นความชื้นจากอากาศที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ด้วยอัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate, MER) คือปริมาณความชื้นที่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบแน่นได้จากสมการ (3.2)

$$MER = \dot{m}_c (H_{in} - H_{out}) \quad (3.2)$$

เมื่อ	MER	คือ อัตราการควบแน่น, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$
	\dot{m}_c	คือ อัตราการไหลอากาศผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกค้ำยัน, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{h}$
	H_{in}	คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศขาเข้า, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{air}}$
	H_{out}	คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศขาออก, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{air}}$

3.3 ขั้นตอนการทำวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่มีการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้น ได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยเปิดการทำงานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบที่ปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นโดยเปิดการทำงานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการอบแห้ง สมรรถนะการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งของระบบทั้งสอง ทั้งนี้ได้ทำการนำพริกชี้หนูแดงไปตาก

แห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพหลังการอบแห้ง ในด้านปริมาณ ความชื้นและคุณภาพของพริกชี้หนูแดงที่ตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

3.3.1 การตากแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยวิธีทางธรรมชาติ

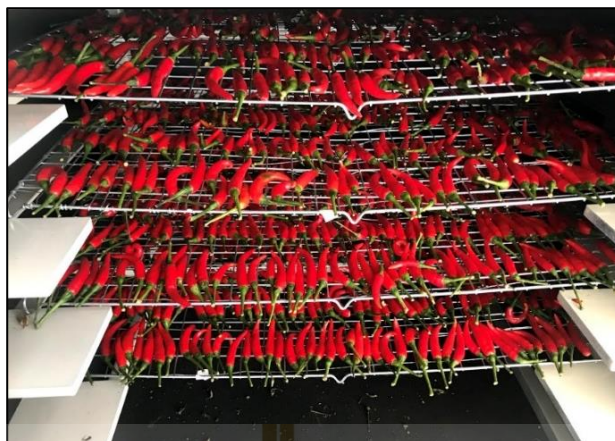
นอกจากต้องการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง โดยทำการเปิดใช้งาน หรือปิดใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นแล้ว ยังจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้กับการตากแห้งทางธรรมชาติด้วย คือการนำพริกชี้หนูแดงจำนวน 3.5 กิโลกรัมไปวางใส่บน ตะแกรงไว้ในที่โล่ง และสามารถสัมผัสกับแสงแดดได้ ระยะเวลาในการนำพริกไปตากแดดในช่วง 8.00 น. ถึง 17.00 น. ทุกวันที่ท้องฟ้าโปร่งใสจนกระทั่งพริกชี้หนูแดงมีน้ำหนักคงที่และสามารถ นำมาเก็บรักษาได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การตากแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยวิธีทางธรรมชาติ

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบอบแห้ง

ในการทดสอบใช้พริกชี้หนูแดงสดซึ่งจากที่ตลาดสดในจังหวัดนครราชสีมา เป็นวัสดุทดสอบทำการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอุณหภูมิที่สร้างขึ้นครั้งละ 3.5 กิโลกรัม ในขั้นตอน การเตรียมการทำการสุ่มตัวอย่างของพริกชี้หนูแดงในภาคแต่ละชั้นประมาณ 15 กรัม เป็นผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างในการทดสอบ ชั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงตัวอย่างเพื่อเก็บค่าน้ำหนักเริ่มต้นก่อนนำไป เรียงตามตะแกรงที่ใช้สำหรับเป็นภาควางวัสดุอบแห้ง โดยการเรียงพริกชี้หนูแดงบนภาคนั้น ได้ทำ การเรียงพริกชี้หนูแดงในแนวเดียวกันเป็นแถว และมีการแบ่งพื้นที่ระหว่างกันให้พอดี เพื่อให้ อากาศอบแห้งสามารถสัมผัสกับผลของพริกชี้หนูแดงได้อย่างทั่วถึง แบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 ชั้นภาค แล้วนำภาคเข้าไปวางไว้ในตู้อบแห้งดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การจัดวางพริกชี้หนูแดงสำหรับการอบแห้ง

3.3.3 การเก็บข้อมูลผลการทดลอง

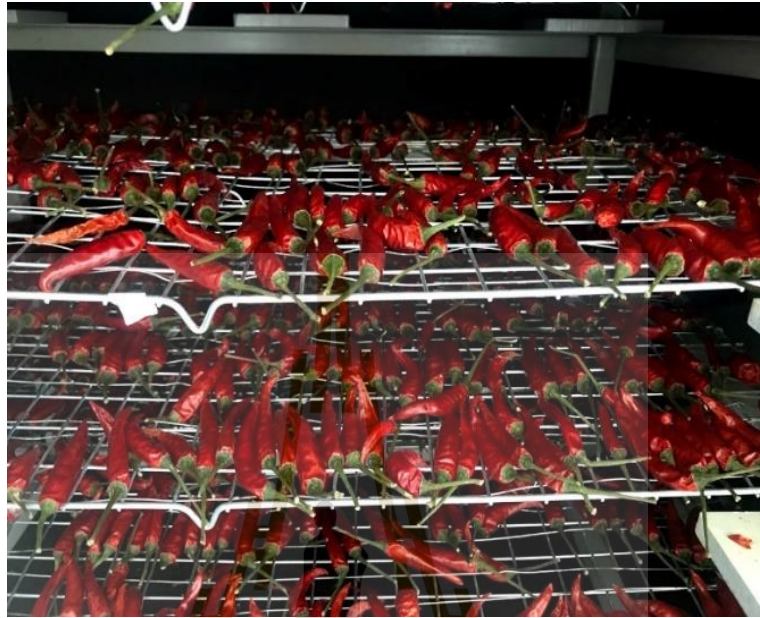
ในส่วนของการเก็บข้อมูลในการทดลองได้ทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งจาก Watt-hour meter และ Power supply ทั้งหมด และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัมทุก 60 นาที เพื่อเก็บบันทึกผล และนำไปใช้สำหรับการคำนวณ

สำหรับสภาวะของการทดลองทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ เปิดเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าสำหรับผลิตอากาศอบแห้ง และเปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวสำหรับผลิตอากาศอบแห้งทดลองซ้ำ 3 ครั้งสำหรับแต่ละการทดลอง ทำการควบคุมสภาวะในการอบแห้งดังนี้

- จ่ายแรงดันไฟให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริก 6.3 V (กรณีทดสอบระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น)
- ตั้งค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 54°C ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโบลวเวอร์แต่ละตัว โดยควบคุมอัตราไหลของอากาศในเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นให้ด้านร้อนเป็น 0.023 kg_{air}/s และด้านเย็นเป็น 0.0058 kg_{air}/s โดยตรวจวัดความเร็วอากาศด้วย Hot wire anemometer

ทำการเก็บบันทึกทั้งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงตัวอย่าง และพลังงานไฟฟ้าตลอดการทดลองอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักผลของพริกชี้หนูแดงตัวอย่างคงที่ (น้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 4 ชั่วโมง) จึงทำการยุติการทดลอง หลังจากนั้นจึงสามารถนำไปคำนวณหาค่า

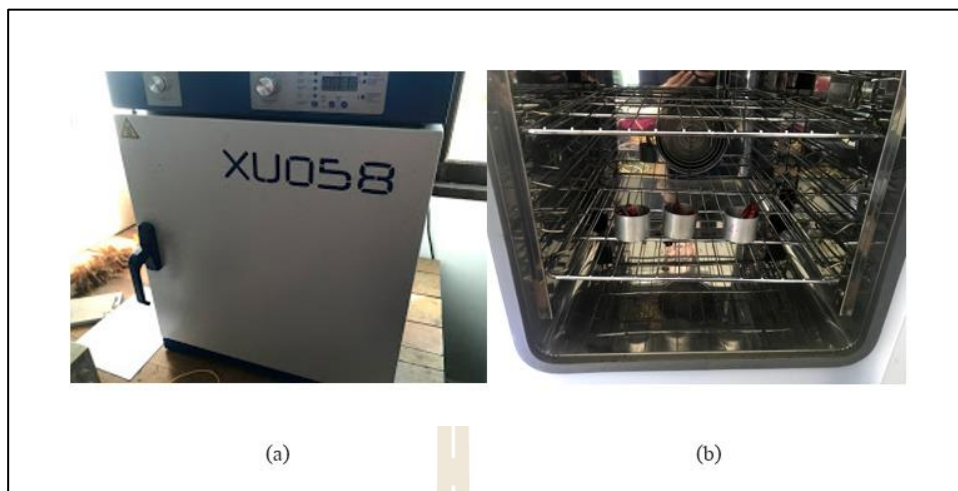
น้ำหนักแห้งต่อไปได้ และทำการเก็บตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบคุณภาพพริกชี้หนูแดงแห้งที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 พริกชี้หนูแดงหลังจากสิ้นสุดการอบแห้ง

3.3.4 การหาน้ำหนักแห้ง

น้ำหนักแห้งมีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ข้อมูล โดยสามารถนำไปคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งได้ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองนั้นตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่นำมาอบแห้งยังคงมีความชื้นหลงเหลืออยู่ภายใน จึงต้องนำผลพริกชี้หนูแดงตัวอย่างไปทำการหาค่าปริมาณน้ำหนักแห้ง ในการหาค่าน้ำหนักแห้งของตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ใช้ในการทดลองนั้น เบื้องต้นต้องนำพริกชี้หนูแดงบรรจุใน Moisture can และชั่งน้ำหนักก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อนยี่ห้อ FRANCE ETUVES รุ่น XU058 (รูปที่ 3.11a) เพื่อไล่ความชื้นที่หลงเหลือออก ทำการอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ กล่าวคือความชื้นได้ระเหยออกจากพริกชี้หนูแดงจนหมดแล้ว



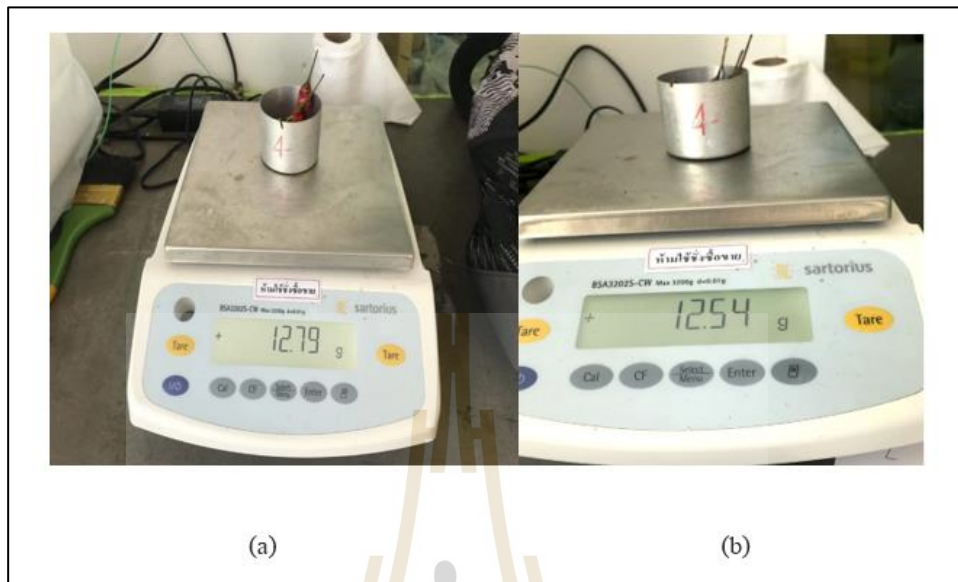
รูปที่ 3.11 (a) ตู้อบลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นหลงเหลือในตัวอย่างพริกชี้หนูแดงจากการทดลอง
(b) การบรรจุตัวอย่างอบแห้งในตู้อบลมร้อน



รูปที่ 3.12 พริกชี้หนูแดงหลังจากไล่ความชื้นหลงเหลือด้วยตู้อบลมร้อน

พริกชี้หนูแดงเมื่อสิ้นสุดการนำไปไล่ความชื้นแล้วนำออกมาจากตู้อบลมร้อนนั้น ถือว่าไม่มีความชื้นหลงเหลือดังรูปที่ 3.12 แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัมยี่ห้อ Sartorius รุ่น 85A - 32025 - CW ก่อนนำไปหักออกด้วยน้ำหนักของ Moisture can จึงได้ค่าน้ำหนักแห้งของพริกชี้หนูแห้งเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป การชั่งน้ำหนักตัวอย่างพริกชี้หนูแดงก่อนและหลังนำเข้าตู้อบลมร้อนแสดงดังรูปที่ 3.13

ปริมาณน้ำหนักแห้ง = น้ำหนักหลังนำออกตู้อบลมร้อน - น้ำหนักถ้วยเปล่า



รูปที่ 3.13 การชั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดง (a) ก่อนและ (b) หลังเข้าตู้อบลมร้อน

3.3.5 ความชื้นของตัวอย่างจากการทดสอบ

ค่าปริมาณน้ำหนักแห้งที่ได้นำไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก และมาตรฐานแห้ง ช่วงเวลาของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นจากสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4

$$\text{ความชื้นมาตรฐานเปียก } MC_w = \frac{m - m_d}{m} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง } MC_d = \frac{m - m_d}{m_d} \times 100 \quad (3.4)$$

- เมื่อ MC_w คือ ร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก
 MC_d คือ ร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง
 m คือ น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาใด ๆ, kg
 m_d คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างทดสอบ, kg

3.3.6 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นนั้นทำการประเมินโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งพริกชี้หนูแดงในช่วงเวลาที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับขดลวดไฟฟ้าและระบบที่เปิดการทำงานของขดลวดไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพนั้นได้มีการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

3.3.6.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการอบแห้ง (Drying curve)

ค่าปริมาณความชื้นที่คำนวณได้นั้นสามารถนำไปสร้างเป็นกราฟแนวโน้มความสัมพันธ์กับเวลาการอบแห้งเพื่อดูพฤติกรรมการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงได้ ทั้งนี้ความชื้นมาตรฐานแห้งยังสามารถนำไปคำนวณเป็นอัตราส่วนความชื้น เพื่อเปรียบเทียบกราฟแนวโน้มของพฤติกรรมการอบแห้งได้ง่ายขึ้น

3.3.6.2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate)

อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเป็นการเฉลี่ยการลดลงของความชื้นภายในพริกชี้หนูแดงอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยการวิเคราะห์อัตราการอบแห้งเฉลี่ยได้ใช้ผลของการทดลองที่ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงมีค่า 14%wb (เท่ากับปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการตากแห้งทางธรรมชาติ) และผลการทดลองช่วงสิ้นสุดการทดลองอัตราการอบแห้งเฉลี่ยหาได้จากสมการที่ 3.5

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (3.5)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้ง, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$
 m_i คือ น้ำหนักก่อนทำการอบแห้ง, kg
 m_f คือ น้ำหนักหลังทำการอบแห้ง, kg
 t คือ เวลา, h

3.3.6.3 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate)

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะเป็นการเปรียบเทียบการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แห้งกับพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยการวิเคราะห์อัตราการระเหยน้ำจำเพาะได้ใช้ผลของการทดลองที่ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงมีค่า 14 %wb และผลการทดลองช่วงสิ้นสุดการทดลองสามารถคำนวณค่าได้ดังสมการที่ 3.6

$$\text{SMER} = \frac{m_i - m_f}{P_e} \quad (3.6)$$

โดยที่ SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$
 m_i คือ น้ำหนักก่อนทำการอบแห้ง, kg
 m_f คือ น้ำหนักหลังทำการอบแห้ง, kg
 P_e คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh

3.3.6.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption)

เป็นการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยของความชื้นออกจากตัวอย่างพริกชี้หนูแดง โดยการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานได้ใช้ผลของการทดลองที่ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงมีค่า 14%wb และผลการทดลองช่วงสิ้นสุดการทดลองจากสมการ (3.7)

$$\text{SEC} = \frac{3.6 P_e}{m_i - m_f} \quad (3.7)$$

โดยที่ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$
 m_i คือ น้ำหนักก่อนทำการอบแห้ง, kg
 m_f คือ น้ำหนักหลังทำการอบแห้ง, kg
 P_e คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh

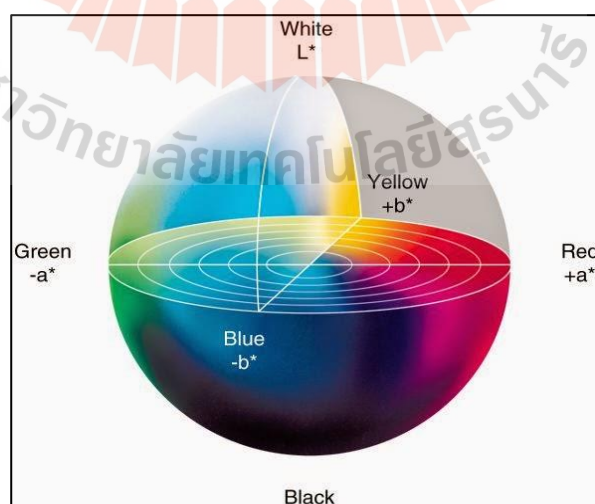
3.3.7 การตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง

ในส่วนของการวัดคุณภาพหลังการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงได้ทำการเปรียบเทียบสีผลของตัวอย่างพริกชี้หนูแดง ก่อนอบแห้งและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นซึ่งทำการทดลองแบบเปิด และไม่เปิดเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นกับการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ ด้วยเครื่องวัดสีชื่อ HunterLab รุ่น ColorQuestXE ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดสี

การวัดสีใช้หลักการของการดูดกลืนแสงของสาร โดยทำการฉายแสงขาว หรือแสงที่อยู่ในช่วงรังสียูวีไปยังโมเลกุลของวัสดุตัวอย่าง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงจนเกิดการเปลี่ยนสถานะไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Wang, Peng, Xie, Bao and He, 2015) การวัดค่าสีได้แสดงออกมาในตัวแปรของหน่วยสีซึ่งได้แบ่งออกเป็น L^* , a^* และ b^* โดยในส่วนของสีของแต่ละค่าตัวแปรหน่วยสีนั้นได้มีสีที่แตกต่างกันออกไปซึ่งมีการถึงแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของตัวแปรของค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ที่มา : Cuesta (2016)

จากการนำตัวอย่างไปทำการวัดค่าสี ค่าตัวแปรค่าสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสีนั้น สามารถนำไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าความต่างของสีของวัสดุทดสอบที่ต้องการได้ โดยทำการใช้ค่าตัวแปรของสีทั้ง L^* , a^* และ b^* ที่ได้จากการวัดสีระหว่างตัวอย่าง 2 ตัวอย่างที่ต้องการทราบความแตกต่างนำมาคำนวณหาค่าความต่างของสี (ΔE) ด้วยสมการที่ (3.8)

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (3.8)$$

โดยที่	ΔE	คือ ความต่างของสีระหว่างตัวอย่างที่ทำการเปรียบเทียบ
	L_1^*, a_1^*, b_1^*	คือ ค่าสีในหน่วย CIELAB ของตัวอย่างวัดสีที่ 1
	L_2^*, a_2^*, b_2^*	คือ ค่าสีในหน่วย CIELAB ของตัวอย่างวัดสีที่ 2



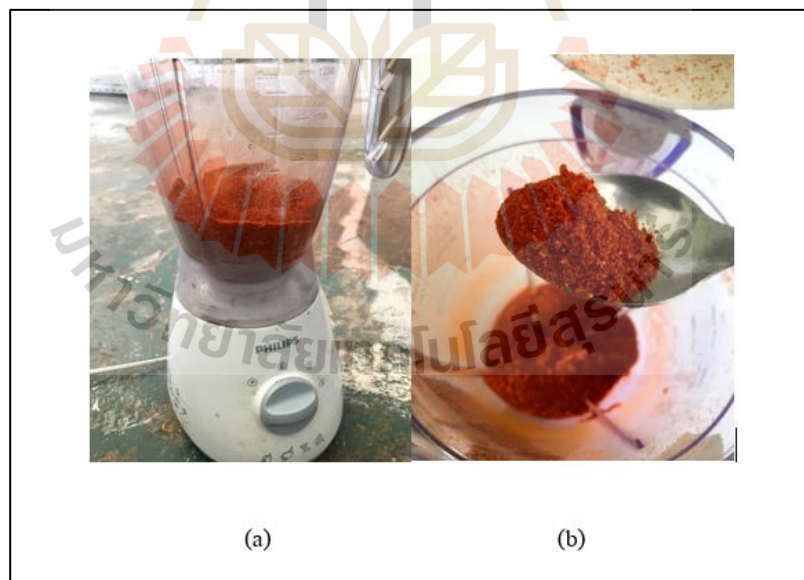
รูปที่ 3.16 การเตรียมการพริกชี้หนูแดงสำหรับนำไปวัดค่าสี

สำหรับการนำผลพริกไปวัดสี ได้ทำการแยกผลพริกชี้หนูแดงออกจากก้านก่อน ดังรูปที่ 3.16 ทั้งนี้เพื่อให้การวัดสีของเนื้อพริกนั้น ไม่มีสีของก้านปะปนไปด้วย และทำการวัดสีของก้านพริกแยกด้วยเช่นกัน อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทดสอบของเครื่องวัดสีซึ่งมีลักษณะเป็น Cubic ขนาด $6 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ลักษณะดังรูปที่ 3.17



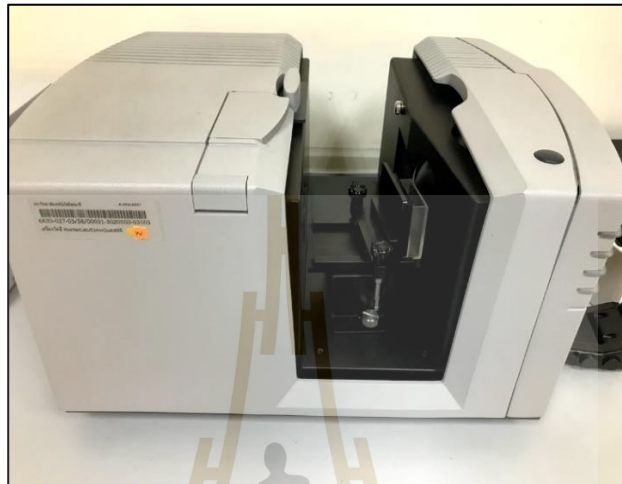
รูปที่ 3.17 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทดสอบการวัดสี

เนื่องจากตัวของผลพริกชี้หนูแดงเมื่อนำไปบรรจุใน Cubic การฉายแสงเพื่อเก็บค่าตัวแปรแสงอาจมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากมีช่องว่างระหว่างผลพริกชี้หนูแดง จึงต้องทำการบั่นละเอียดผลพริกชี้หนูแดงก่อนนำไปบรรจุสำหรับการวัดสี เช่นเดียวกันกับก้านของพริกชี้หนูแดงที่จะต้องทำการบั่นละเอียดก่อนนำไปทำการวัดสีดังรูปที่ 3.18a และ b



รูปที่ 3.18 การบั่นพริกชี้หนูแดงสำหรับการวัดสี (a) การบั่นพริกด้วยเครื่องบั่นอเนกประสงค์
(b) ผงพริก

เมื่อนำพริกชี้หนูแดงปั้นที่บรรจุใส่ Cubic เสร็จแล้วนำไปวัดสีด้วยเครื่องวัดสี ซึ่งมีการถอดตำแหน่งไม่ให้ตัวบรรจุขยับได้ดังรูปที่ 3.19 อีกทั้งยังทำการปิดช่องเพื่อป้องกันไม่ให้มีแสงภายนอกเข้ามารบกวนการหาค่าตัวแปรสี



รูปที่ 3.19 การจัดวางอุปกรณ์บรรจุตัวอย่างวัดสี

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เทอร์โมอิเล็กทริก

ในส่วนของผลการทดลองในหัวข้อวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบขั้นต้นเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับป้อนให้เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นในเครื่องอบแห้งพริกชี้หนูแดง จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 5.5 - 6.5 V ได้ทำการเลือกแรงดันไฟฟ้าที่ 6.3 V ดังแสดงไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลที่ได้คือ เกิดการควบแน่นความชื้นจากอากาศภายในเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นบริเวณครีบริบความร้อนที่ติดตั้งบนเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่งเย็นผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1



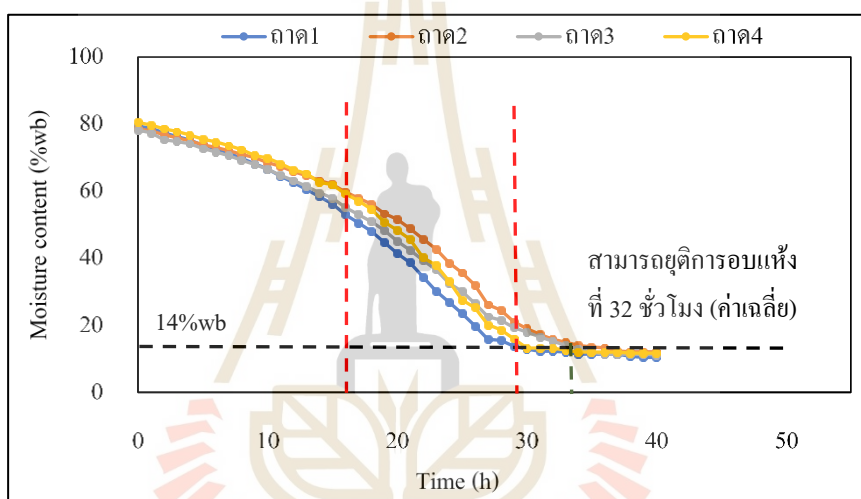
รูปที่ 4.1 การควบแน่นความชื้นจากอากาศที่เกิดขึ้นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

การควบแน่นความชื้นจากอากาศนั้นเมื่อทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 พบว่า ค่าอัตราการควบแน่นน้ำจากอากาศ (Moisture extraction rate, MER) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ $0.083 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ การควบแน่นที่เกิดขึ้นมีความหมายว่าการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นนั้นสามารถลดความชื้นของอากาศอบแห้งก่อนนำมาเพิ่มความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ในส่วนของการทำงานทำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก (ด้านตรงข้ามที่เกิดการควบแน่น) ยังสามารถทำความร้อนได้ถึง 120 W ดังตารางที่ 3.3 ในบทที่ 3

4.2 การประเมินสมรรถนะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

4.2.1 พฤติกรรมการอบแห้งเมื่ออบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

จากการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (TEC + Heater) จนกระทั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงคงที่จึงยุติการทดลอง เมื่อนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงไปคำนวณหาค่าน้ำหนักแห้งและคำนวณหาปริมาณความชื้นในช่วงระยะเวลาที่ทำการอบแห้ง สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นพริกชี้หนูแดงกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเมื่อเปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลพริกชี้หนูแดงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยเป็นกลุ่มตัวอย่างของพริกชี้หนูแดงที่ทำการติดตามไว้ พบว่ามีการกระจายอากาศอบแห้งไปยังถาดวางพริกชี้หนูแดงได้อย่างทั่วถึง การลดลงของปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงที่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันในทุกถาด (เรียงลำดับชั้นจากชั้นบนสุดไปยังล่างสุด เป็นถาด 1 - ถาด 4) ในด้านระยะเวลาในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงในถาดแต่ละชั้นนั้นเมื่อทำการอบแห้ง โดยเปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าพบว่าใช้เวลานานถึง 40 ชั่วโมง เนื่องจากผลของพริกชี้หนูแดงในการทดลองมีปริมาณความชื้นสูงถึง 77.4%wb และมีสารเคลือบ (Wax of chilies) ทางธรรมชาติ (Marnoto, Sulistyowati, Mahreni, & Syahri, 2012) ส่งผลให้การ

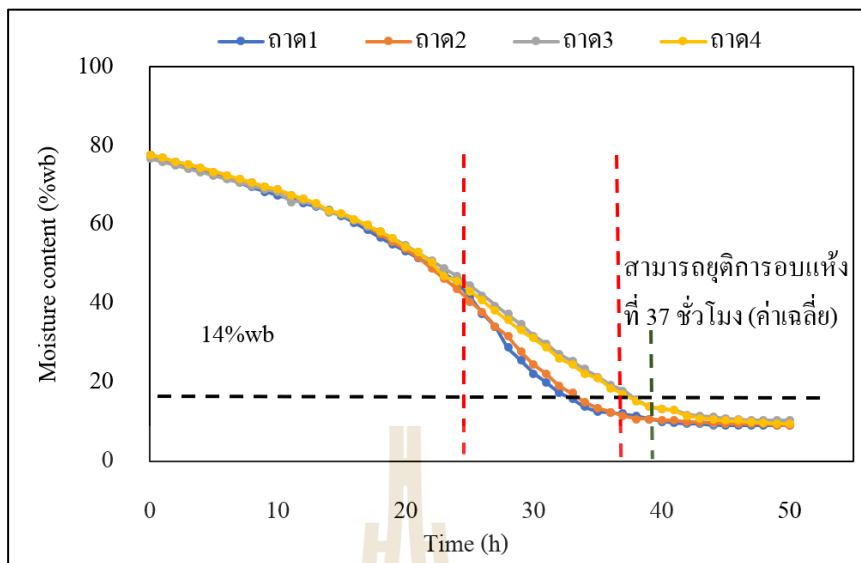
เคลื่อนตัวของน้ำภายในผลพริกชี้หนูแดงออกมาสู่ผิวสัมผัสเพื่อแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศได้ยากจึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงนาน แต่ก็ยังใช้เวลาน้อยกว่าการนำพริกชี้หนูแดงไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลาถึง 5 วัน

พบว่าในช่วงระยะเวลาการอบแห้งที่ประมาณ 0 - 15 ชั่วโมง มีการลดลงของความชื้นด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพริกชี้หนูแดงเริ่มสัมผัสกับอากาศอบแห้งและเกิดการระเหยน้ำออกจากตัวผลจนกระทั่งการระเหยน้ำจากผลพริกออกไปยังอากาศอบแห้งเกิดขึ้นอย่างคงที่หรืออัตราการอบแห้งเข้าสู่สมดุล โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีแนวโน้มลดลง (ความชันติดลบและลดลง) จนกระทั่งช่วงระยะเวลาการอบแห้งชั่วโมงที่ 15 - 28 ใช้เวลาทั้งสิ้น 13 ชั่วโมง ซึ่งอัตราการลดลงของความชื้นในตัวพริกชี้หนูแดงเริ่มคงที่ ความชื้นจากภายในของผลพริกชี้หนูแดงเคลื่อนตัวออกมาสู่ผิวสัมผัสและเกิดการระเหยออกไปกับอากาศอบแห้งอย่างคงที่ส่งผลให้การลดลงของปริมาณความชื้นมีแนวโน้มในการลดลงแบบคงที่เช่นกัน หลังจากนั้นเมื่อปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงเริ่มลดลงจนมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลพริกชี้หนูแดงออกมาภายนอกได้น้อยลง (เนื่องจากความดันของความชื้นภายในมีค่าต่ำไปด้วย) ช่วงระยะเวลาในการอบแห้งตั้งแต่ 28 ชั่วโมงเป็นต้นไป จึงมีการลดลงที่ค่อนข้างช้า จนกระทั่งไม่มีการลดลงของความชื้น และปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงได้มีค่าเข้าสู่ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) กับอากาศอบแห้ง โดยมีค่าความชื้นมาตรฐานเปียก 11.93% wb

อย่างไรก็ตามในการใช้งานเครื่องอบแห้งเราจะทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นมีค่าต่ำกว่า 14%wb (ต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ) ซึ่งสามารถเก็บรักษาพริกชี้หนูแดงแห้งอย่างปลอดภัย โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพียง 32 ชั่วโมงไม่จำเป็นต้องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบจนสิ้นสุดกระบวนการ หรือจนความชื้นมีค่าคงที่เพื่อประหยัดพลังงานในการอบแห้งอีกด้วย

เครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียว

ในการอบแห้งโดยเปิดเฉพาะฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) เมื่อนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงไปอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงมีค่าคงที่ แล้วหาค่าน้ำหนักแห้งก่อนนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้นในช่วงระยะเวลาที่ทำการอบแห้งซึ่งสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.3



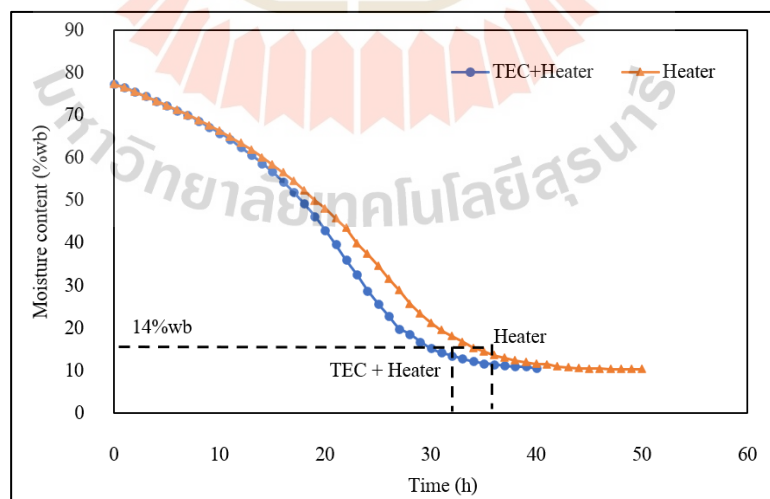
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นพริกชี้หนูแดงกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเมื่อเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

รูปที่ 4.3 แสดงข้อมูลของพริกชี้หนูแดงที่นำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยเป็นกลุ่มตัวอย่างของพริกชี้หนูแดงที่ทำการติดตามไว้ พบว่ามีการกระจายอากาศอบแห้งไปยังถาดวางพริกชี้หนูแดงได้อย่างทั่วถึงปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงมีแนวโน้มการลดลงที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกันกับระบบ TEC + Heater ในด้านระยะเวลาในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงเมื่อเปิดการทำงานเฉพาะ Heater นี้ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 50 ชั่วโมง ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงจากปริมาณความชื้น 77.45%wb จนกระทั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงจึงมีค่าคงที่ และยุติการทดลอง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการนำพริกชี้หนูแดงไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติเช่นกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ TEC + Heater ในการผลิตอากาศแห้งสำหรับการอบแห้งต้นแบบ เนื่องจากการใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นมาร่วมในการผลิตอากาศอบแห้งสามารถลดความชื้นออกจากอากาศอบแห้งก่อนนำไปเข้าห้องอบแห้งซึ่งส่งผลให้ความชื้นสามารถระเหยออกจากพริกชี้หนูแดงได้ดีกว่าระบบที่ใช้ Heater เพียงอย่างเดียว

พบว่าในช่วงระยะเวลาการอบแห้งที่ประมาณ 0 - 22 ชั่วโมง เป็นช่วงที่ความชื้นในพริกชี้หนูแดงมีการลดลงด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพริกชี้หนูแดงเริ่มสัมผัสกับอากาศอบแห้งและเกิดการระเหยน้ำออกจากตัวผลจนกระทั่งการระเหยน้ำเกิดขึ้นอย่างคงที่ หรืออัตราการอบแห้งคงที่ โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งคงที่ แต่โดยรวมแล้วระยะเวลาในการปรับตัวเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ของระบบที่ใช้ Heater

ในการผลิตอากาศอบแห้งอย่างเดียวนั้นใช้เวลานานกว่าระบบ TEC + Heater ในการผลิตอากาศอบแห้ง เมื่อความชื้นภายในตัวพริกชี้หนูแดงเคลื่อนตัวออกมายังผิวของพริกชี้หนูแดงอย่างคงที่อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในพริกชี้หนูแดงจึงมีค่าคงที่ในช่วงระยะเวลาการอบแห้งชั่วโมงที่ 22 - 35 ใช้เวลาทั้งสิ้น 13 ชั่วโมง เท่ากันกับระบบ TEC + Heater ในช่วงนี้ความชื้นในตัวพริกชี้หนูแดงเข้าสู่สมดุลกับความชื้นในอากาศอบแห้ง ความชื้นจากภายในของผลพริกชี้หนูแดงเคลื่อนตัวออกมาสู่ผิวสัมผัสและเกิดการระเหยออกไปกับอากาศอบแห้งอย่างคงที่ ส่งผลให้การลดลงของปริมาณความชื้นมีแนวโน้มในการลดลงแบบคงที่เช่นกัน หลังจากนั้นเมื่อปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงเริ่มลดลงจนมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลพริกชี้หนูแดงออกมาภายนอกได้น้อยลง ช่วงระยะเวลาในการอบแห้งตั้งแต่ 35 ชั่วโมงเป็นต้นไป จึงมีการลดลงที่ค่อนข้างช้า จนกระทั่งไม่มีการลดลงของความชื้น และปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงได้เข้าสู่ค่าความชื้นสมดุลกับอากาศอบแห้งที่ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก 12.37%wb

อย่างไรก็ตามในการใช้งานเครื่องอบแห้งเราจะทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นมีค่าต่ำกว่า 14%wb (ต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ) ซึ่งสามารถเก็บรักษาพริกชี้หนูแดงแห้งอย่างปลอดภัย โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพียง 37 ชั่วโมง (นานกว่าระบบ TEC + Heater ถึง 5 ชั่วโมง) ไม่จำเป็นต้องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ หรือจนความชื้นมีค่าคงที่เพื่อประหยัดพลังงานในการอบแห้งอีกด้วย เมื่อนำทั้ง 2 ระบบมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการอบแห้งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมของการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่เปิดและปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นแนวโน้มการลดลงของปริมาณความชื้นพริกชี้หนูแดงเมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นระหว่างระบบที่เปิดการใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่เปิดใช้งานฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว ซึ่งได้แบ่งผลการทดลองออกเป็นสองเส้น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 54°C ของทั้งสองระบบนั้นสามารถลดปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงให้ต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่ทำการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ (14%wb) ดังแสดงตามเส้นปะในรูปที่ 4.4 จากการเปรียบเทียบทั้งสองระบบพบว่าแนวโน้มในการลดลงของปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกของระบบที่เปิดการทำงานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้นเริ่มมีอัตราการลดลงที่มากกว่าระบบที่เปิดการทำงานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวประมาณชั่วโมงการอบแห้งที่ 10 (สังเกตได้จากความชันของกราฟที่แตกต่างกันและกราฟทั้งสองเส้นเริ่มแยกออกจากกันอย่างชัดเจน) นอกจากนี้ระบบที่เปิดการทำงานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นยังสามารถอบแห้งพริกชี้หนูแดงจนกระทั่งปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกคงที่โดยใช้ระยะเวลาน้อยกว่าถึง 10 ชั่วโมง เนื่องจากการที่เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นสามารถควบคุมความชื้นบางส่วนออกจากอากาศอบแห้งได้จึงทำให้ได้อากาศอบแห้งที่มีความชื้นต่ำมีความสามารถในการอบแห้งดีกว่า

4.2.2 ค่าสมรรถนะที่ได้จากการทดสอบ

หลังจากการนำพริกชี้หนูแดงไปทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นด้วยชุดผลิตอากาศอบแห้งทั้ง 2 ระบบ ได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งในส่วนของน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงในแต่ละชั่วโมงที่ทำการอบแห้ง อีกทั้งยังทำการบันทึกค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงเพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต้นแบบซึ่งแสดงออกมาดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลของการอบแห้งพริกชี้หนูแดงและค่าสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

รายการ	สิ้นสุดการทดลอง	14%wb
น้ำหนักตัวอย่าง (kg)	3.50 ± 0	3.50 ± 0
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	77.40 ± 1.58	77.40 ± 1.58
น้ำหนักสิ้นสุดการอบแห้ง (kg)	0.80 ± 0.09	0.83 ± 0.11
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	10.57 ± 1.7	14.00 ± 0
เวลาในการอบแห้ง (h)	40.67 ± 2.08	32.00 ± 3
ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ (kg)	2.70 ± 0.09	2.67 ± 0.11

ตารางที่ 4.1 ผลของการอบแห้งพริกชี้หนูแดงและค่าสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
ต้นแบบด้วยระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (ต่อ)

รายการ	สิ้นสุดการทดลอง	14%wb
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	47.10 ± 0.85	36.87 ± 1.14
อัตราการไหลอากาศ (kg/s)	0.0288 ± 0	0.0288 ± 0
อัตราการไหลอากาศผ่าน TEC ฝั่งร้อน (kg/s)	0.023 ± 0	0.023 ± 0
อัตราการไหลอากาศผ่าน TEC ฝั่งเย็น (kg/s)	0.0058 ± 0	0.0058 ± 0
DR (kg _{water} /h)	0.0665 ± 0.003	0.0837 ± 0.006
SMER (kg _{water} /kWh)	0.0574 ± 0.003	0.0723 ± 0.003
SEC (MJ/kg _{water})	62.8876 ± 3.32	49.8228 ± 2.02

หมายเหตุ : เป็นค่าที่เกิดจากการเฉลี่ยผลการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.2 ผลของการอบแห้งพริกชี้หนูแดงและค่าสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
ต้นแบบด้วยระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

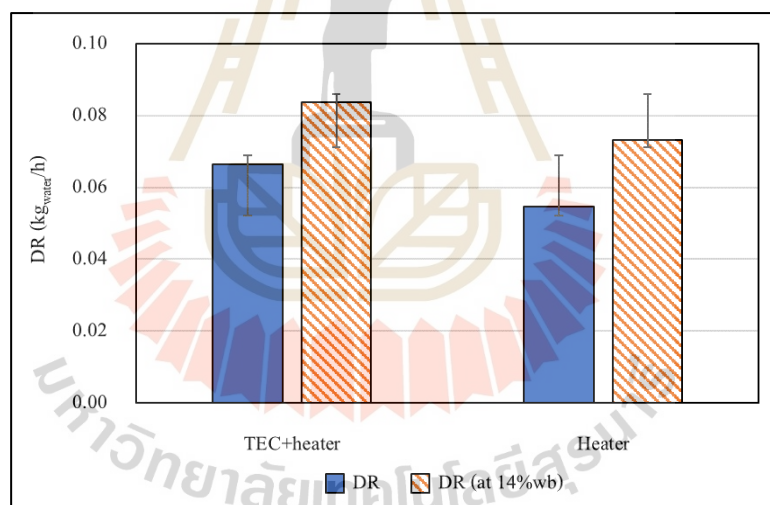
รายการ	สิ้นสุดการทดลอง	14%wb
น้ำหนักตัวอย่าง (kg)	3.50 ± 0	3.50 ± 0
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	77.34 ± 0.43	77.34 ± 0.43
น้ำหนักสิ้นสุดการอบแห้ง (kg)	0.88 ± 0.01	0.92 ± 0.01
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	10.38 ± 1.17	14.00 ± 0
เวลาในการอบแห้ง (h)	48.00 ± 3	35.33 ± 2.9
ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ (kg)	2.62 ± 0.01	2.58 ± 0.01
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	56.29 ± 4.42	40.28 ± 3.74
อัตราการไหลอากาศ (kg/s)	0.0288 ± 0	0.0288 ± 0
อัตราการไหลอากาศผ่าน TEC ฝั่งร้อน (kg/s)	0.023 ± 0	0.023 ± 0
อัตราการไหลอากาศผ่าน TEC ฝั่งเย็น (kg/s)	0.0058 ± 0	0.0058 ± 0
DR (kg _{water} /h)	0.0546 ± 0.003	0.0733 ± 0.005
SMER (kg _{water} /kWh)	0.0466 ± 0.003	0.0644 ± 0.005
SEC (MJ/kg _{water})	77.4715 ± 5.69	56.2414 ± 5.14

หมายเหตุ : เป็นค่าที่เกิดจากการเฉลี่ยผลการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ในส่วนของตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 เป็นตารางแสดงผลของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบรวมไปถึงผลของการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบทั้ง 2 ระบบ โดยแบ่งออกเป็นตารางละ 2 ส่วน คือ ผลและประสิทธิภาพการอบแห้งพริกชี้หนูแดงของเครื่องอบแห้งต้นแบบระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (ตารางที่ 4.1) และระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียว (ตารางที่ 4.2) แต่ละระบบได้ทำการแบ่งระยะเวลาการยุติการทดลองออกเป็น สิ้นสุดการทดลองเมื่ออบแห้งจนน้ำหนักของผลิตภัณฑ์พริกชี้หนูแดงมีค่าคงที่ และยุติการทดลองที่ความชื้นผลิตภัณฑ์เท่ากับ 14% ความชื้นมาตรฐานเปียกของพริกแห้งที่มีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกของพริกตัวอย่างที่ได้จากการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ ค่าต่าง ๆ ที่แสดงนี้จะนำเสนอในรูปแบบกราฟแท่งเพื่อการอภิปรายผลในหัวข้อถัดไป

4.2.3 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate)

ในส่วนของอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสามารถบ่งบอกถึงความเร็วในการระเหยความชื้นจากพริกชี้หนูแดง แสดงดังรูปที่ 4.5



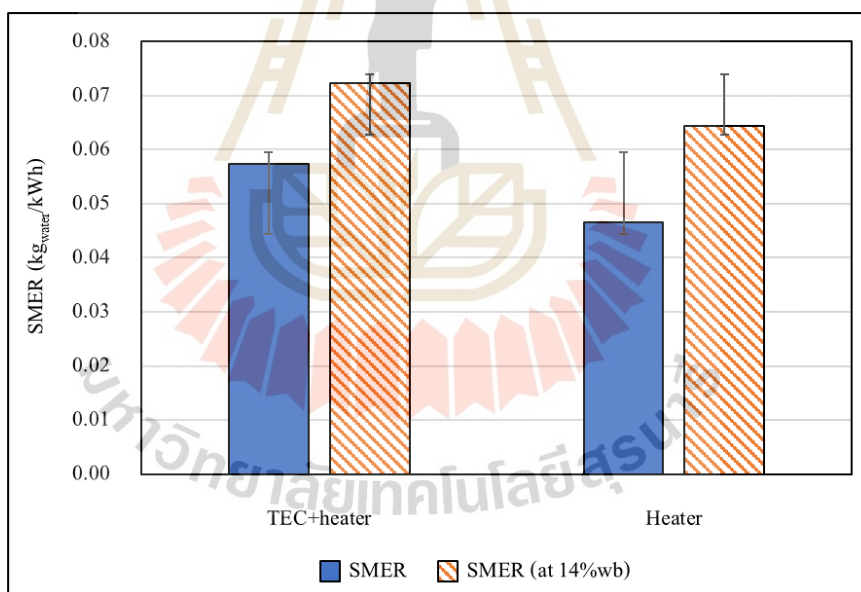
รูปที่ 4.5 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้งทั้ง 2 ระบบ ซึ่งค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยแต่ละระบบนั้นมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อแสดงด้วยกราฟแท่ง นอกจากนี้ยังทำการแบ่งระหว่างค่าอัตราการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงที่สิ้นสุดการทดลองกับยุติการทดลองที่ปริมาณความชื้น 14%wb พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของระบบที่

เปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่า $0.0665 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ย $0.0546 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ เช่นเดียวกันเมื่อทำการยุติการอบแห้งที่ปริมาณความชื้น $14\% \text{wb}$ พบว่าระบบที่เปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย $0.0837 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบที่เปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย $0.0733 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ แสดงให้เห็นว่าการเปิดใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นที่ส่วนด้านเย็นของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สามารถควบแน่นความชื้นออกจากอากาศอบแห้งได้ (ลดความชื้นออกจากอากาศอบแห้งก่อนนำเข้าสู่ห้องอบแห้ง) ส่งผลให้อากาศอบแห้งมีความสามารถในการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดงได้ดีกว่า อีกทั้งยังสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งทำให้ประหยัดเวลาสำหรับการอบแห้งอีกด้วย

4.2.4 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate)

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ หรือ SMER บ่งบอกได้ถึงอัตราการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดงต่อพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วย (kWh) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6



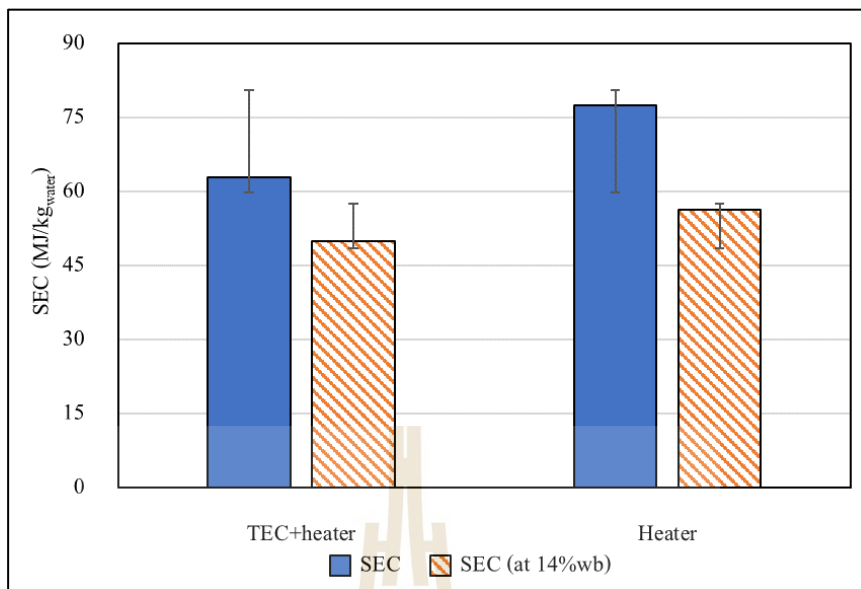
รูปที่ 4.6 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำจำเพาะระหว่างการอบแห้งทั้ง 2 ระบบซึ่งค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะแต่ละระบบนั้นมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อแสดงด้วยกราฟแท่ง นอกจากนี้ยังทำการแบ่งระหว่างค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของพริกชี้หนู

แดงที่สิ้นสุดการทดลอง กับยุติการทดลองที่ปริมาณความชื้น 14%wb พบว่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของระบบที่เปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่า $0.0574 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ $0.0466 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ เช่นเดียวกันเมื่อทำการยุติการอบแห้งที่ปริมาณความชื้น 14%wb พบว่าระบบที่เปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ $0.0723 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ มีค่าสูงกว่าระบบที่เปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ $0.0644 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ บ่งบอกได้ว่าการเปิดใช้งานอุปกรณ์การอุ่นอากาศขึ้นต้นสามารถทำการระเหยน้ำออกจากพริกชี้หนูแดงได้ดีกว่าเมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งที่เท่ากัน เนื่องจากเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นสามารถทำให้อากาศอบแห้งมีคุณภาพที่ดีกว่าด้วยการลดความชื้นซึ่งใช้พลังงานค่อนข้างต่ำสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกในเครื่องอุ่นอากาศ นอกจากนี้เครื่องอุ่นอากาศยังสามารถทำการอุ่นอากาศขึ้นต้นซึ่งเป็นการลดภาระให้แก่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้อีกด้วย

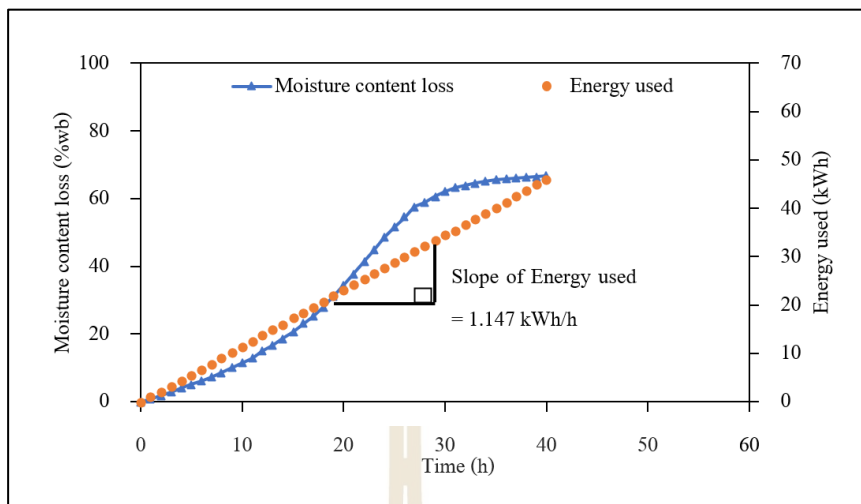
4.2.5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption)

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หรือ SEC แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่จ่ายให้แก่เครื่องอบแห้งต้นแบบในการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดง 1 กิโลกรัม ซึ่งผลจากการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบทั้ง 2 ระบบพบว่าการเปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นสำหรับการอบแห้งพริกชี้หนูแดงมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ $62.89 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ซึ่งสิ้นเปลืองน้อยกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานสูงถึง $77.47 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ เช่นเดียวกันกับกรณีที่ยุติการทดลองที่ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดง 14%wb โดยระบบที่เปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ $49.82 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ที่มีความสิ้นเปลืองน้อยกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน $56.24 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ บ่งบอกได้ว่าการเปิดใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นประหยัดพลังงานกว่าเนื่องจากการเปิดใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นช่วยเพิ่มคุณภาพของอากาศอบแห้งทำให้สามารถทำการอบแห้งพริกชี้หนูแดงได้มีประสิทธิภาพมากกว่า อีกทั้งยังมีการอุ่นอากาศเพื่อลดภาระของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าอัตราการระเหยน้ำของการอบแห้งพริกชี้หนูแดง

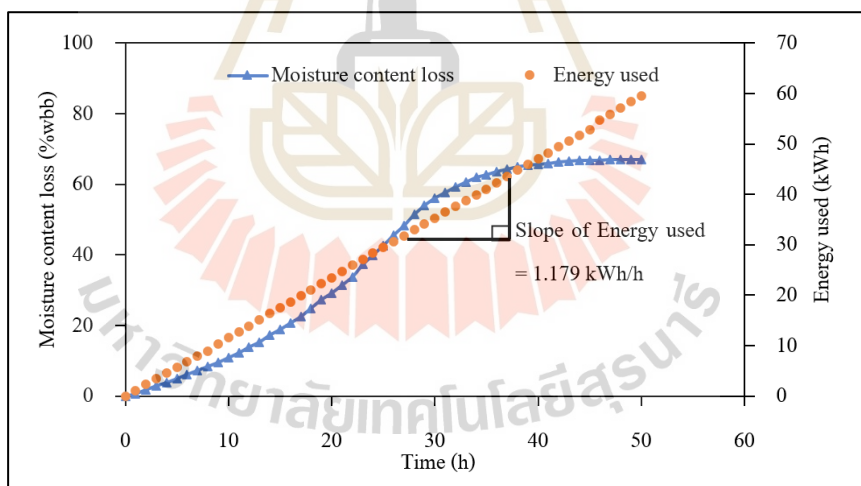


รูปที่ 4.7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพริกชี้หนูแดงเมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงของเครื่องอบแห้งต้นแบบพบว่ามีค่าที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากว่าในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงนั้น โดยรวมต้องใช้พลังงานในการทำงานของเครื่องอบแห้งสูง สามารถอธิบายได้ด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์กับการใช้พลังงานในการอบแห้งสะสมในแต่ละชั่วโมงที่ทำการอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์และพลังงานสะสมในแต่ละช่วงเวลาในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์และพลังงานสะสมในแต่ละช่วงเวลาในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

จะเห็นได้ว่าเนื่องจากการอบแห้งพริกขี้หนูแดงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองทั้งระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต้องใช้ระยะเวลานานถึง 40 ชั่วโมง และระบบที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง

นานถึง 50 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นการใช้พลังงานในการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบสะสมสูงตามไปด้วย ทั้งนี้ระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นนั้นใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า นอกจากนั้นยังมีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่า (เนื่องจากความชันของเส้นกราฟพลังงานสะสมต่ำกว่า) ส่งผลให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ต่ำกว่าระบบที่เปิดการทำงานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานในการระเหยน้ำพบว่าช่วงที่อัตราการระเหยน้ำคงที่ใช้พลังงานในการระเหยน้ำได้ดีที่สุด ส่วนช่วงท้ายของการทดลองใช้พลังงานสูงที่สุดในการระเหยน้ำ เนื่องจากผลิตผลเหลือความชื้นต่ำ

4.3 การประเมินคุณภาพหลังการอบแห้ง

4.3.1 ผลของการนำพริกชี้หนูแดงไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

จากการทดลองนำพริกชี้หนูแดงไปตากแดดตามธรรมชาติในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. ของแต่ละวัน พบว่าการตากแห้งดำเนินการไปถึง 5 วันในการทำให้พริกชี้หนูแดงแห้งจนสามารถเก็บรักษาได้ดังรูปที่ 4.10 แล้วทำการหาปริมาณความชื้นสุดท้ายของพริกชี้หนูแดงตากแห้ง พบว่ามีค่าอยู่ที่ 14%wb ซึ่งมีส่วนนำไปใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้น กล่าวคือ ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงที่ทำการตากแห้งถือว่าเท่ากับปริมาณความชื้นของพริกที่สามารถนำไปจำหน่าย หรือเก็บรักษาได้



รูปที่ 4.10 ผลของการนำพริกชี้หนูแดงไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

4.3.2 ผลของการเปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในเครื่องอบแห้ง

จากการทดสอบนำพริกชี้หนูแดงมาทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยระบบที่ใช้ในการผลิตอากาศอบแห้งสำหรับการทดลองนี้คือ เครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นที่ทำงานร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (TEC + Heater) ผลการทดสอบพบว่าผลพริกชี้หนูแดงหลังการอบแห้งยังคงมีสีแดงโดยสีซีดลดลงเล็กน้อย สิ่งที่เปลี่ยนไปคือความเรียบของผิวผลพริกซึ่งเป็นเรื่องปกติเมื่อปริมาณความชื้นในผลิตผลลดลง เช่นเดียวกับก้านของพริกชี้หนูแดงที่ยังคงความเป็นสีเขียว แตกต่างกับการนำพริกไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติอย่างสิ้นเชิง ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยเปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามียุทธลักษณะดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการผลิตอากาศอบแห้ง

4.3.3 ผลของการเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

การทดลองด้วยอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยใช้การผลิตอากาศอบแห้งด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) เพียงอย่างเดียว พบว่าตัวของผลพริกชี้หนูแดงหลังการอบแห้งมีลักษณะเหมือนกับการใช้เครื่องอุ่นอากาศชั้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (TEC + Heater) คือ ตัวผลมีสีแดงแต่ซีดลดลงเล็กน้อย และความเรียบของผิวที่ลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เสียไป ในส่วนของก้านของพริกชี้หนูแดงยังคงมีสีเขียวสดคล้ายเดิม แตกต่างกับการนำพริกไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติอย่างสิ้นเชิง ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการอบแห้ง

ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการนำพริกชี้หนูแดงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวในการผลิตอากาศอบแห้ง

4.3.4 การเปรียบเทียบกับค่าสี

ในการประเมินคุณภาพหลังการอบแห้งได้ทำการนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงอบแห้งรวมไปถึงพริกชี้หนูสดไปทำการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการนำพริกชี้หนูแดงทั้งส่วนของก้านและผลไปทำการอบแห้งทำให้สีซีดลงเนื่องจากค่า L^* มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความสว่างมีค่ามากขึ้นหรือสีซีดลงนั่นเอง ในส่วนของผลพริกชี้หนูแดงเห็นได้ว่าพริกชี้หนูแดงสดมีค่า a^* (+) ที่แสดงความเป็นสีแดงสูงที่สุดแต่เมื่อนำไปการอบแห้งด้วยระบบที่มีการเปิดใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ ระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว และการนำไปตากแห้งพบว่า มีค่า a^* ลดลงน้อยไปมากตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศร่วมกับฮีตเตอร์รักษาความเป็นสีแดงได้มากที่สุด เช่นเดียวกับส่วนของการที่มีค่า a^* (-) แสดงความเป็นสีเขียวที่มีแนวโน้มเหมือนกันกับส่วนของผลคือ เมื่อนำไปผ่านการอบแห้งด้วยระบบที่มีการเปิดใช้งานเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ ระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว และการนำไปตากแห้ง มีการเปลี่ยนแปลงค่า a^* (-) จากน้อยไปมากตามลำดับ โดยค่าของก้านพริกชี้หนูแดงที่นำไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติมีค่า a^* เป็น (+) เนื่องจากตัวก้านมีสีที่ซีดจนกลายเป็นสีเหลือง

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรค่าสีของผล/ก้านพริกชี้หนูแดงสดและผ่านการอบแห้งในแต่ละกรรมวิธี

ลำดับที่	วิธีการ/เครื่องมือ	วิเคราะห์สี		
		เครื่อง Hunter Lab Color/ QuestXE		
	ตัวอย่าง/รายการทดสอบ	L*	a*	b*
1	ก้านพริก วิธีที่ 1 TEC	49.52	-1.84	27.98
2	ก้านพริก วิธีที่ 2 heater	48.37	-0.86	28.6
3	ก้านพริก ตากแดด	49.84	2.86	26.89
4	ก้านพริกสด	32.41	-2.41	22.69
5	ผลพริก วิธีที่ 1 TEC	33.73	30.39	32.35
6	ผลพริก วิธีที่ 2 heater	33.97	29.4	30.79
7	ผลพริก ตากแดด	30.66	28.66	29.02
8	ผลพริกสด	27.67	36.16	38.22

หมายเหตุ

1. ค่า L* (+) แสดงถึงความสว่าง
2. ค่า a* (+) แสดงถึงความเขียว
3. ค่า a* (-) แสดงถึงความแดง
4. ค่า b* (+) แสดงถึงความเหลือง
5. ค่า b* (-) แสดงถึงความน้ำเงิน

ทั้งนี้ได้ทำการนำค่าสีที่ได้ขึ้นไปหาค่าความเปลี่ยนแปลงไปของสี (Delta E) โดยได้ทำการนำพริกชี้หนูแดงแต่ละกรรมวิธีไปเปรียบเทียบกับดังนี้

- เปรียบเทียบผลพริกสดกับผลพริกแห้งที่อบแห้งด้วยระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (พริกสด - ระบบTEC)
- เปรียบเทียบผลพริกสดกับผลพริกแห้งที่อบแห้งด้วยระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (พริกสด - ระบบ Heater)
- เปรียบเทียบผลพริกสดกับผลพริกแห้งที่อบแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ (พริกสด - ตากแห้ง)
- เปรียบเทียบก้านพริกสดกับก้านพริกแห้งที่อบแห้งด้วยระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (พริกสด - ระบบTEC)
- เปรียบเทียบก้านพริกสดกับก้านพริกแห้งที่อบแห้งด้วยระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (พริกสด - ระบบ Heater)

- เปรียบเทียบก้านพริกสดกับก้านพริกแห้งที่อบแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ (พริกสด - ตากแห้ง)

ผลการเปรียบเทียบที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของการเปรียบเทียบค่าสีของผลและก้านของพริกชี้หนูแดงเมื่อนำไปทำให้แห้งด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบ	Delta E	
	ผลพริก	ก้านพริก
พริกสด - ระบบ TEC	10.22122	17.91818
พริกสด - ระบบ Heater	11.85717	17.08953
พริกสด - ตากแห้ง	12.24051	18.68737

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อนำพริกชี้หนูแห้งที่ทำการอบแห้งด้วยแต่ละกรรมวิธีเทียบกับพริกสด พบว่าในส่วนของพริกชี้หนูแดงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งสองระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปของสีน้อยกว่าพริกชี้หนูแดงที่นำไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติทั้งส่วนของผลและก้านของพริกชี้หนูแดง แต่ค่าความต่างกันของสีนั้นเห็นได้ว่ามีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งหมด เนื่องจากในการนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงไปทำการวัดสีนั้นต้องนำไปทำการปั่นก่อนอย่างที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้วในการอบแห้งนั้นส่วนที่ได้รับผลกระทบเป็นหลักคือ ผิวที่ภายนอก แต่เมื่อนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงไปปั่นละเอียดแล้วเมื่อนำไปทำการวัดค่าสีจึงมีการปะปนระหว่างผิวภายนอกและภายในของตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่นำไปปั่นละเอียดนั่นเอง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบขนาด 216 ลิตร มีภาคเป็นตะแกรงสำหรับวางผลิตผลที่จะนำมาใช้ในการอบแห้ง โดยมีการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นและฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำหรับการปรับสภาวะของอากาศให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้ในการอบแห้งเพื่อนำไปใช้สำหรับการอบแห้งพริกชี้หนูแดงซึ่งเป็นตัวอย่างผลิตผลทดสอบปริมาณ 3.5 กิโลกรัม สำหรับการนำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการอบแห้งพบว่าได้ค่าดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น (TEC)

สำหรับเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นนั้นมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยสามารถใช้ประโยชน์จากการผลิตความร้อนสำหรับการอุ่นอากาศขึ้นต้น เพื่อลดภาระแก่ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และการสร้างความเย็นเพื่อใช้สำหรับการควบแน่นความชื้นให้แก่อากาศ ก่อนนำไปเพิ่มอุณหภูมิแล้วนำเข้าสู่ห้องอบแห้ง เพราะฉะนั้นการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศนั้นสามารถช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มคุณภาพของอากาศอบแห้งได้อีกด้วย

5.1.2 การประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

ในส่วนของผลของการนำพริกชี้หนูแดงมาทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบซึ่งแบ่งเป็นสองระบบคือ ระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว ซึ่งได้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 54°C และควบคุมอัตราการไหลอากาศไหลผ่านเครื่องอบแห้ง $0.0288 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{s}$ โดยแบ่งอากาศไหลผ่านเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นด้านร้อนเป็น $0.023 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{s}$ และด้านเย็นเป็น $0.0058 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{s}$

5.1.2.1 พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying curve)

ในด้านการลดปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกของพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งสองระบบนั้นระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นนั้นสามารถลดปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกจนมีค่าคงที่ หรือสิ้นสุดการอบแห้งได้เร็วกว่าถึง 10 ชั่วโมง

5.1.2.2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate)

ในส่วนของอัตราการอบแห้งเฉลี่ยนั้นระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่สูงกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเมื่อพิจารณาทั้งการสิ้นสุดการทดลอง เมื่อปริมาณความชื้นฐานเปียกคงที่ และที่ 14%wb

5.1.2.3 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate)

ในส่วนของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะนั้นระบบระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่สูงกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเมื่อพิจารณาทั้งการสิ้นสุดการทดลอง เมื่อปริมาณความชื้นฐานเปียกคงที่ และที่ 14%wb

5.1.2.4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน (Specific energy consumption)

ในส่วนของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นระบบที่เปิดการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถอบแห้งพริกชี้หนูแดงมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ที่ต่ำกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเมื่อพิจารณาทั้งการสิ้นสุดการทดลองที่ปริมาตรมาตรฐานเปียกคงที่ และที่ 14%wb

สรุปได้ว่าการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นนั้นสามารถเพิ่มคุณภาพของอากาศอบแห้งโดยการควบคุมความชื้นออกจากอากาศอบแห้งซึ่งส่งผลให้อากาศสามารถระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดง ได้ดียิ่งขึ้นและช่วยประหยัดเวลาในการอบแห้ง นอกจากนี้การอุ่นอากาศยังลดภาระการใช้พลังงานในส่วน of ฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้อีกด้วย

5.1.3 การประเมินคุณภาพหลังการอบแห้ง

จากการนำผลของการวัดสีของพริกชี้หนูแดงเพื่อเปรียบเทียบค่าความต่างกันระหว่างผล/ก้านของพริกชี้หนูแดงสด และผล/ก้านของพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นกับการนำไปตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ โดยค่าความต่างของสีทั้งผล ก้านของพริกชี้หนูแดงสดและพริกชี้หนูแดงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งสองระบบมีค่าความต่างน้อยกว่าการเปรียบเทียบสีของพริกชี้หนูแดงสดกับพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นนั้นมีการติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริก 12 ตัว (2 แถว แถวละ 6 ตัว) ซึ่งจากการทดลองพบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกที่วางไว้ในส่วนท้ายบางส่วนไม่สามารถควบคุมความชื้นได้เนื่องจากในช่วงต้นทางของเครื่องอุ่นอากาศนั้นอากาศได้ทำการระบายความร้อน

นอกจากด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกได้จนมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ระบายความร้อนให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริกช่วงทำยไม่ค่อยคืนักจึงเป็นส่วนที่ควรปรับปรุงสำหรับการทดลองนี้



รายการอ้างอิง

- จุฑาศินี พรพุททศรี และศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. (2555). การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ฝักโดยใช้ปั๊มความร้อน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 4-5 เมษายน: 566-570.
- ฐานิตย์ เมธียนนท์, สมชาติ โสภณธฤทธิ์ และธนิต สวัสดิ์เสวี. (2541). การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์. 33: 461-473
- ฉันทกร ทูริสุทธิ์. (2554). การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2545). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล และสมยศ เชิญอักษร. (2551). การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ: การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 39(3) (พิเศษ): 164-167.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2552). การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 3-7.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2555). การคงคุณภาพฝักอบแห้งกิ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. รายงานการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธิตวัฒน์ สิริพันธุ์กุล. (2550). ความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ฝักรวมอบแห้งกิ่งสำเร็จรูป ในอำเภอเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่. รายงานการค้นคว้าอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปฐมพงษ์ จิโน, ธีรายุ ปิ่นทอง และโกเมน หมาয়มัน. (2557). การศึกษาระบบทำน้ำร้อนและน้ำเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์. การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6 ณ มหาวิทยาลัยบูรพา วันที่ 20-21 มีนาคม: 231-243.
- ลือพงษ์ ลือนาม, สมศักดิ์ คูหาสวรรค์เวช และดวงกมล ธรรมาธิวัฒน์. (2556). การวิจัยการอบแห้งพริกโดยใช้ความร้อนจากเตาเผาถ่าน. รายงานวิจัย สาขาวิชาพัฒนาการเกษตรและการจัดการทรัพยากร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ศิริพร พิกุลทอง, วราพร ชมชื่น, ธัญรัตน์ เรียงภักดี และกระวี ตรีอำรรค. (2558) เครื่องอบแห้ง บั้มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก. **โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**. สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุทธิศักดิ์ ภัทรสถาพรกุล. (2543). การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบบั้มความร้อน. **วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**.
- สุภาพรณัฏ์ ปิติพร. (2552). **บันทึกของแผ่นดิน ๑: หย้า ยา สมุนไพรใกล้ตัว**. ปราจีนบุรี: มูลนิธิ โรงพยาบาลอภัยภูเบศร.
- สมชาย มณีวรรณ. (2549). ระบบระบายความร้อนชุดซีพียูโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก. **โครงการวิจัย ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย มหาวชิราลงกร**.
- สิริธร สุภาคาร, รติพันธ์ เหลือมพล, สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ และอภิชาติ อัจฉนาเสียว. (2559). การอบแห้งแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสูบลมความร้อนสุญญากาศ. **วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)**. 16(3): 1-11.
- เสริม จันทร์ฉาย. (2560). **เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2-9.
- อัญชญา อู่ประกุล, จรัญ คนแรง และไพโรจน์ คิวงนกร. (2558). การอบแห้งผักตบชวาโดยใช้ระบบ บั้มความร้อน. **ลักทอง: วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 2(1): 35-40.
- อิทธิเทพ พึ่งเมือง. (2559). เครื่องควบแน่นน้ำโดยประยุกต์ใช้เพลเทียร์. **วิทยานิพนธ์วิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- Abasi, S., Minaei, S. and Khoshtaghaza, M.H. (2016) Performance of a recirculating dryer equipped with desiccant wheel. **Drying Technology**. 34(8): 863-870.
- Aemarine. (2012). **Vapor Compression System**. [ออนไลน์]. ใ้ได้จาก: <http://refrigerations.blogspot.com/2012/01/vapor-compression-system.html>
- Al-Madhhachi, H. and Min, G. (2017). Effective use of thermal energy both hot and cold side of thermoelectric module for developing efficient thermoelectric water distillation system. **Energy Conversion and Management**. 133: 14-19.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S. and Benjapiyaporn, C. (2010). Development of vacuum heat pump dryer for drying chilli. **Biosystems Engineering**. 105: 130-138.
- Cao, L., Han, J. and Huo, C. (2017). Design and Experiment Study of a New Thermoelectric Cooling Helmet. **Procedia Engineering**. 205:1426-1432.

- Chakravert, A. and Singh, R.P. (2002). **Postharvest Technology: Cereals, Pulses, Fruits and Vegetables**. Enfield: Science Publishers, Inc.
- Cuesta, A.M. (2016). An investigation into different post-harvest treatments (MAP) on Green Bell Peppers (*Capsicum annuum L. cv. Cupra*). **Submitted as part requirement for the Degree of BSc (Hons) Horticulture, Writtle College and the University of Essex**. April 2016, pp. 9.
- Enescu, D., Ciocia, A., Mazza, A. and Russo, A. (2017) Solutions based on thermoelectric refrigerators in humanitarian contexts. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. 22:134-149.
- Fatouh, M., Metwally, M.N., Helali, A.B. and Shedid, M.H. (2006). Herbs drying using a heat pump dryer. **Energy Conversion and Management**. 47: 2629-2643.
- Fellows, P. (2000). **Food Processing Technology** (2nd). New York: CRC Press.
- Harmony House Foods, Inc. (2014). **Do Dehydrated Vegetables Lose Nutritional Value?** [On-line]. Available: <http://www.harmonyhousefoods.com/blog-nutritional-value-dehydrated-veggies>
- He, R., Zhong, H., Cai, Y., Liu, D. and Zhao, F. (2017) Theoretical and Experimental Investigations of Thermoelectric Refrigeration Box Used for Medical Service. **Procedia Engineering**. 205: 1215-1222.
- Jiji, L.M. (2009). **Heat Convection** (2nd). New York: Springer.
- Kivevele, T. and Huan, Z. (2014). A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa. **South African Journal of Science**. 110: 1-11.
- Marnoto, T., Sulistyowati, E., Mahreni, Syahri, M. (2012). The Characteristic of Heat Pump Dehumidifier Drier in the Drying of Red Chilli (*Capsium annuum L.*). **International Journal of Science and Engineering**. 3(1): 22-25
- McPherson, M.J. (1993). **Psychrometry: The study of moisture in air**. Virginia: Springer
- Paine, F.A. and Paine, H.Y. (1992). **A Handbook of Food Packaging** (2nd). New York: Blackie Academic & Professional. 306.
- Perera, C.O. and Rahman, M.S. (1997). Heat pump dehumidifier drying of food. **Trends in Food Science & Technology**. 8: 75-79.
- Putra, R.N. and Ajiwiguna, T.A. (2017). Influence of Air Temperature and Velocity for Drying Process. **Procedia Engineering**. 170: 516-519.

- Rahman, M.S. and Perera, C.O. (2007). **Handbook of Food Preservation** (2nd). New York: CRC Press.
- Shi, Q., Xue C., Zhao, Y., Li, Z and Xang, X. (2008). Drying Characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier. **Journal of Food Engineering**. 84:12-20
- Universal Industrial Gases, Inc. (1992). **Psychrometric Chart** [On-line]. Available: <http://uigi.com/psychrometry.html>
- Wongpaisarnkit, P, Treeamnuk, K and Treeamnuk, T. (2018). Thermal Performance Evaluation of Thermoelectric Module. **Proceeding of the Eighth International Conference on Advance in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques (MAPT2018)** at G Tower Hotel, Kuala Lumpur, 3-4 Febuary: 25-29.
- Yadav, A.K., Singh, S. and Gupta, G. (2014). Solar Air-Conditioning: Design for a Compressor-Less System Using Peltier Effect. **International Journal of Advance Research and Innovation**. 2(2): 429-432.
- Wang, H., Peng, J., Xie, C., Bao, Y. and He, Y. (2015). Fruit Quality Evaluation Using Spectroscopy Technology: A Review. **Sensors** 2015, 15(5): 1189-11927.





ภาคผนวก ก

ตารางผลการเก็บข้อมูล

ตารางที่ ก.1 ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด
การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

เวลา	ชั่วโมง	kWh	พลังงานสะสม	ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4
11.40	0	102.4	0	12.15	14.94	13.25	13.18
12.40	1	103.3	1.159	11.8	14.48	12.76	12.67
13.40	2	104.1	2.218	11.09	13.8	11.71	12.04
14.40	3	104.9	3.277	10.58	13.27	11.44	11.58
15.40	4	105.7	4.336	10.11	12.8	11.17	11.09
16.40	5	106.5	5.395	9.51	12.21	10.57	10.52
17.40	6	107.4	6.554	9.16	11.85	10.18	10.17
18.40	7	108.2	7.613	8.75	11.44	9.81	9.74
19.40	8	109.1	8.772	8.28	11	9.37	9.32
20.40	9	110	9.931	7.86	10.65	9	8.77
21.40	10	110.85	11.04	7.49	10.14	8.61	8.53
22.40	11	111.7	12.149	7.05	9.79	8.17	8.08
23.40	12	112.6	13.308	6.69	9.35	7.83	7.65
0.40	13	113.5	14.467	6.33	9.03	7.48	7.4
1.40	14	114.4	15.626	6.01	8.67	7.12	6.88
2.40	15	115.35	16.835	5.71	8.41	6.86	6.76
3.40	16	116.4	18.144	5.33	7.94	6.43	6.31
4.40	17	117.2	19.203	5.06	7.6	6.14	6
5.40	18	118.2	20.462	4.81	7.28	5.87	5.67
6.40	19	119.2	21.721	4.53	6.84	5.58	5.23
7.40	20	120.25	23.03	4.27	6.6	5.25	4.98
8.40	21	121.1	24.139	4.08	6.24	5	4.73
9.40	22	122.1	25.398	3.81	5.88	4.75	4.3

ตารางที่ ก.1 ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด
การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (ต่อ)

เวลา	ชั่วโมง	kWh	พลังงานสะสม	ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4
10.40	23	123	26.557	3.58	5.57	4.54	4.14
11.40	24	123.9	27.716	3.42	5.2	4.27	3.85
12.40	25	124.7	28.775	3.27	4.96	4.12	3.55
13.40	26	125.6	29.934	3.12	4.69	3.92	3.44
14.40	27	126.6	31.193	2.97	4.32	3.72	3.22
15.40	28	127.3	32.152	2.96	4.23	3.67	3.16
16.40	29	128.2	33.311	2.9	4.04	3.57	3.06
17.40	30	129.1	34.47	2.87	3.94	3.51	2.96
18.40	31	129.8	35.429	2.85	3.86	3.45	2.96
19.40	32	130.74	36.628	2.85	3.79	3.4	2.96
20.40	33	131.7	37.847	2.84	3.75	3.35	2.94
21.40	34	132.6	39.006	2.82	3.71	3.31	2.92
22.40	35	133.55	40.215	2.82	3.69	3.27	2.92
23.40	36	134.5	41.424	2.82	3.68	3.25	2.92
0.40	37	135.5	42.683	2.82	3.64	3.25	2.92
1.40	38	136.4	43.842	2.8	3.63	3.25	2.91
2.40	39	137.4	45.101	2.79	3.63	3.25	2.91
3.40	40	138.45	46.41	2.79	3.63	3.24	2.91

หมายเหตุ : น้ำหนักแห้งของถาดที่ 1 คือ 2.5 g

น้ำหนักแห้งของถาดที่ 2 คือ 3.19 g

น้ำหนักแห้งของถาดที่ 3 คือ 2.88 g

น้ำหนักแห้งของถาดที่ 4 คือ 2.57 g

ตารางที่ ก.2 ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด
การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

เวลา	ชั่วโมง	kwh	สะสมพลัง	ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4
17.30	0	143.5	0	11.54	13.86	16.29	13.43
18.30	1	144.6	1.154	11.09	13.41	15.75	13
19.30	2	145.9	2.508	10.55	12.87	15.18	12.45
20.30	3	146.9	3.562	10.13	12.45	14.71	12.08
21.30	4	148	4.716	9.89	12.03	14.23	11.64
22.30	5	149.1	5.87	9.58	11.61	13.75	11.25
23.30	6	150.2	7.024	9.12	11.21	13.35	10.89
0.30	7	151.3	8.178	8.78	10.88	12.95	10.52
1.30	8	152.45	9.382	8.43	10.51	12.57	10.19
2.30	9	153.6	10.586	8.17	10.16	12.2	9.8
3.30	10	154.75	11.79	7.92	9.93	11.92	9.64
4.30	11	155.9	12.994	7.72	9.48	11.08	9.22
5.30	12	157.05	14.198	7.47	9.22	11.11	8.95
6.30	13	158.2	15.402	7.27	8.86	10.82	8.65
7.30	14	159.37	16.626	7.12	8.42	10.27	8.18
8.30	15	160.56	17.87	6.82	8.28	10.09	8.06
9.30	16	161.7	19.064	6.52	7.95	9.76	7.75
10.30	17	162.9	20.318	6.24	7.63	9.42	7.45
11.30	18	164	21.472	5.97	7.29	9.06	7.16
12.30	19	165.2	22.726	5.72	6.95	8.7	6.87
13.30	20	166.4	23.98	5.52	6.68	8.36	6.56
14.30	21	167.5	25.134	5.32	6.41	8.04	6.34
15.30	22	168.7	26.388	5.12	6.04	7.72	6.03
16.30	23	169.8	27.542	4.92	5.75	7.41	5.62

ตารางที่ ก.2 ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด
การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (ต่อ)

เวลา	ชั่วโมง	kwh	สะสมพลัง	ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4
17.30	24	171	28.796	4.72	5.48	7.14	5.51
18.30	25	172.1	29.95	4.42	5.2	6.84	5.26
19.30	26	173.3	31.204	4.12	4.97	6.54	5.04
20.30	27	174.4	32.358	3.92	4.69	6.26	4.83
21.30	28	175.6	33.612	3.62	4.53	6.03	4.65
22.30	29	176.75	34.816	3.47	4.28	5.8	4.48
23.30	30	178	36.12	3.32	4.09	5.56	4.34
0.30	31	179.05	37.224	3.22	3.97	5.4	4.2
1.30	32	180.2	38.428	3.12	3.82	5.2	4.04
2.30	33	181.3	39.582	3.06	3.73	5.08	3.96
3.30	34	182.5	40.836	2.99	3.63	4.94	3.84
4.30	35	183.6	41.99	2.95	3.57	4.82	3.79
5.30	36	184.8	43.244	2.94	3.53	4.7	3.67
6.30	37	186.1	44.598	2.93	3.49	4.62	3.6
7.30	38	187.5	46.052	2.91	3.46	4.49	3.53
8.30	39	188.5	47.106	2.89	3.46	4.4	3.47
9.30	40	189.4	48.06	2.87	3.45	4.36	3.45
10.30	41	190.4	49.114	2.86	3.45	4.35	3.43
11.30	42	191.6	50.368	2.85	3.43	4.3	3.38
12.30	43	192.7	51.522	2.85	3.43	4.28	3.36
13.30	44	193.8	52.676	2.84	3.42	4.27	3.34
14.30	45	194.8	53.73	2.84	3.41	4.25	3.33
15.30	46	196	54.984	2.84	3.41	4.24	3.33
16.30	47	196.9	55.938	2.84	3.41	4.23	3.32

ตารางที่ ก.2 ผลการเก็บข้อมูลของการทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งที่เปิด
การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (ต่อ)

เวลา	ชั่วโมง	kwh	สะสมพลัง	ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4
17.30	48	198	57.092	2.84	3.41	4.23	3.31
18.30	49	199.2	58.346	2.84	3.4	4.23	3.3
19.30	50	200.3	59.5	2.84	3.4	4.23	3.3

หมายเหตุ : น้ำหนักแห้งของถาดที่ 1 คือ 2.58 g

น้ำหนักแห้งของถาดที่ 2 คือ 3.09 g

น้ำหนักแห้งของถาดที่ 3 คือ 3.79 g

น้ำหนักแห้งของถาดที่ 4 คือ 2.99 g

ตารางที่ ก.3 ผลของการปรับสภาวะอากาศของเครื่องอุ่นอากาศขึ้นต้น

	Temperature (° C)	23.4
Air input (Position 1)	RH (%)	77
	Abs humidity (g _{water} /kg _{air})	13.988
	Temperature (° C)	23
Passed TEC's cool side (Position 2c)	RH (%)	57
	Abs humidity (g _{water} /kg _{air})	10.032
	Temperature (° C)	33.1
Passed TEC's hot side (Position 2h)	RH (%)	48.1



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ในส่วนของการคำนวณได้ยกตัวอย่างผลการทดสอบของการอบแห้งพริกที่หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้ปริมาณ 3.5 kg โดยใช้ผลการทดสอบด้วยระบบที่ใช้เครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น

ข.1 การคำนวณการควบแน่นความชื้นของเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น

จากข้อมูลดังตารางที่ ก.3 และค้นหาข้อมูลด้วย Psychrometric chart ทำให้ได้ค่าดังนี้

$$\omega_1 = 13.988 \text{ g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{air}}, \omega_{2c} = 10.032 \text{ g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{air}} \text{ และอัตราการไหลของอากาศที่ผ่าน}$$

ด้านเย็นของ TEC = 0.023 kg_{air}/s

เมื่อ ตำแหน่งที่ 1 คือ อากาศก่อนเข้าเครื่องอุ่นอากาศขั้นต้น

ตำแหน่งที่ 2c คือ อากาศออกจากผ่านด้านเย็นของ TEC ภายในเครื่องอุ่นอากาศด้านเย็น

$$\begin{aligned} \text{MER} &= \dot{m}(\omega_1 - \omega_{2c}) = 0.0058(13.988 - 10.032) = 0.0229 \text{ g}_{\text{water}}/\text{h} \\ &= 0.0229 \times 3600/1000 \\ &= 0.083 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h} \end{aligned}$$

ข.2 การคำนวณตัวแปรของการอบแห้งพริก

2.1 การคำนวณปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (ตัวอย่างของความชื้นเริ่มต้นถาดที่ 1) กำหนดให้น้ำหนักแห้งเท่ากับ 2.5 g

$$\text{MC}_w = \frac{m - m_d}{m} = \frac{12.15 - 2.5}{12.15} \times 100 = 79 \% \text{wb}$$

2.2 การคำนวณหาอัตราการอบแห้งเฉลี่ย

กำหนดให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 11.33 %wb และระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 40 h

หาค่าน้ำหนักแห้งโดยรวม ที่ค่าเริ่มต้นเมื่อทราบปริมาณความชื้นเริ่มต้น 79 %wb

$$m_d = m \times (1 - \text{MC}_w) = 3.5 \times (1 - \frac{79}{100}) = 0.735 \text{ kg}$$

พิจารณาที่ความชื้นสุดท้ายเพื่อหาน้ำหนักของพริกที่ตำแหน่งสิ้นสุดการทดลอง

$$m = \frac{m_d}{1 - MC_w} = \frac{0.735}{1 - 11.33/100} = 0.829 \text{ kg}$$

จึงสามารถคำนวณอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของการทดลองได้ดังนี้

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} = \frac{3.5 - 0.829}{40} = 0.0668 \text{ kg/h}$$

2.3 การคำนวณอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

กำหนดให้พลังงานสะสมที่ใช้จนถึงสิ้นสุดการทดลอง = 46.61 kWh

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{P_c} = \frac{3.5 - 0.829}{46.61} = 0.0573 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$$

2.4 การคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงาน

$$SEC = \frac{3.6 P_c}{m_i - m_f} = \frac{3.6 (46.61)}{3.5 - 0.829} = 62.82 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$$



ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

พชร ว่องไพศาลกิจ, ศักรินทร์ ปาปะเก, กระจวี ตรีอำรรค และเทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2560). การประเมินระยะความสุขของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเทคนิคการตอบสนองทางความถี่เสียง. การประชุมวิชาการวิทยากรหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 15. ขอนแก่น: โรงแรมอวานี ขอนแก่น โฮเทล แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์. ระหว่างวันที่ 13-14 กรกฎาคม 2560.

Patchara Wongpaisarnkit, Krawee Treeamnuk and Tawarat Treeamnuk. (2018). Thermal Performance Evaluation of Thermoelectric Module. Proceeding of the Eighth International Conference in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques (MAPT2018). Kuala Lumpur, Malaysia: G Tower Hotel. 3-4 February 2018.

พชร ว่องไพศาลกิจ, กระจวี ตรีอำรรค และเทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2563). การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ปีที่ 14 ฉบับที่ 1: 82-96.

การประเมินระยะความสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเทคนิคการตอบสนองทางความถี่เสียง
Maturity Stages Evaluation of Mango (Nam Dok Mai's Cultivar) by use Acoustic Response Technique

พชร วงศ์ไพศาลกิจ¹ ศักรินทร์ปาปะเก¹ กระวี ตริอำนาจรค์และ เทวรัตน์ ตริอำนาจรค์²
Patchara Wongpaisarnkit¹, Sakarin Papakae¹, Krawee Treemnu¹ and Tawarat Treemnu²

Abstract

This research aimed to evaluate the maturity stages of harvested mango (Nam Dok Mai's cultivar) by use the acoustic response technique. In this testing, harvested mango fruits were maintained in the storage immediately at $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ and 65.5% relative humidity of air condition. Resonance frequency of fruit (f), plunger test firmness (F_{peel}) and total soluble solid (TSS) were collected from 20 fruits of mango sample per day, the test was done in every day until the fruits was senescence. The result showed that the firmness and TSS could be use in a co-variables to evaluate the maturity stages of mango into 3 stages include of unripe, ripe and overripe. A time after harvested influence on the reducing of mango acoustic frequency in exponential trend form. The using of resonance frequency in maturity stages evaluation gave 79.5% of precision include of 94.8% of unripe, 70.5% of ripe and 80.6% of over ripe respectively.

Keywords: Nam dok mai mango, Resonance frequency, Maturity stage.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินช่วงระยะความสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยวด้วยการตอบสนองทางความถี่เสียงของผลมะม่วง การทดสอบใช้ผลมะม่วงน้ำดอกไม้ไม่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ และ ความชื้นสัมพัทธ์ 65.5% ทันทีหลังเก็บเกี่ยว ตรวจสอบค่าความถี่สั่นพ้อง (f) ความแน่นเนื้อแบบกดผ่านเปลือก (F_{peel}) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ของผลมะม่วงจำนวน 20 ผล ทุกวันจนมะม่วงถึงระยะเน่าเสีย ผลการทดสอบพบว่าสามารถใช้ค่าความแน่นเนื้อและ TSS ร่วมกันจำแนกมะม่วงออกได้เป็น 3 ระยะ คือ Unripe, Ripe และ Over ripe จำนวนวันหลังเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ความถี่สั่นพ้องมีแนวโน้มลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และการใช้ความถี่สั่นพ้องของผลมะม่วงในการประเมินระยะความสุกมีความแม่นยำในการจำแนกมะม่วงได้ 79.5% โดยแบ่งเป็นค่าความถูกต้องในช่วงระยะยังไม่สุก 94.8% ช่วงระยะสุก 70.5% และช่วงระยะใกล้เน่าเสีย 80.6% ตามลำดับ

คำสำคัญ: มะม่วงน้ำดอกไม้, ความถี่สั่นพ้อง, ระยะความสุก

คำนำ

มะม่วงเป็นผลผลิตที่มีลักษณะทางกายภาพ และรสชาติที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะความสุกของผลมะม่วงหลังจากเก็บเกี่ยว เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งในกลุ่ม Climacteric fruit ที่ภายหลังการเก็บเกี่ยวสามารถเปลี่ยนระยะการสุกได้ด้วยตัวมันเอง เพราะมะม่วงมีการผลิตสารเอทิลินที่ตอบสนองต่อเอทิลินจากภายนอกผล โดยที่เอทิลินในผลนั้นจะกระตุ้นให้ผลเกิดการสุกด้วยการรับเอทิลินจากภายนอกผล (จริงแท้, 2549) ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของมะม่วงเปลี่ยนไป นอกจากนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลช้าเกินกว่าวันที่ผลสุกเต็มที่ ผลที่ได้อาจมีการเหี่ยวและหดตัวลง ใกล้เน่าเสีย (Jha *et al.*, 2007) มะม่วงสามารถนำไปประกอบอาหารได้หลายรูปแบบแตกต่างกันออกไปตามระยะความสุกของผล และความนิยมของผู้บริโภค ก่อนที่จะจำหน่ายผลมะม่วงจึงจำเป็นต้องมีการจำแนกระยะความสุกของมะม่วงก่อน หรือแม้แต่การส่งมะม่วงไปยังสถานที่ไกลออกไปก็ต้องใช้เวลาในการขนส่งก็จำเป็นต้องจำแนกผลมะม่วงที่ยังไม่สุกเพื่อป้องกันผลมะม่วงอยู่ในระยะใกล้เน่าเสียเมื่อส่งถึงผู้บริโภค

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima 30000

²สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima 30000

* Corresponding author: patchara.wong@hotmail.com

ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายผลเป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบความสุกของผลไม้โดยไม่ให้เกิดการสูญเสียต่อคุณภาพของผลไม้ ซึ่งใช้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติภายนอก เช่น สีผล, การเคาะแล้วฟังเสียง และอายุผลหลังดอกบาน เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีอัตตวิสัย (Subjective method) ต้องใช้ความชำนาญของผู้วัดอีกทั้งยังผิดพลาดได้ง่าย จึงถูกประยุกต์มาใช้เป็นวิธีวัตถุวิสัย (Objective method) โดยการใช้เครื่องมือที่เชื่อถือได้มาช่วยในการวัดค่าแล้วนำไปเทียบกับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับระยะความสุกโดยอิงวิธีอัตตวิสัย (อนุพันธ์.2546) ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะตรวจสอบระยะความสุกของมะม่วงด้วยการเคาะผลมะม่วงแล้วรับค่าความถี่สั่นพ้องที่สะท้อนมาจากตัวผลพร้อมประมวลผลด้วย Application n-track tuner บนอุปกรณ์สื่อสารแบบสมาร์ตโฟน เพื่อนำมาใช้จำแนกระยะความสุกโดยการวิเคราะห์ร่วมกับค่าคุณภาพของมะม่วง คือ ความแน่นเนื้อ, ความต้งจำเพาะ, ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดของผลมะม่วง

วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูลคุณสมบัติ

1. **ความถี่ของมะม่วง** ใช้อุปกรณ์ดัง Fig.1(a) ซึ่งประกอบไปด้วยฐานวางมะม่วงที่พันล้อมด้วยโฟมเพื่อป้องกันเสียงรบกวน การทดสอบใช้ไม้ตีซิม(Fig.1(b))เคาะเบาๆ ลงบนผลมะม่วงในห้องที่มีเสียงรบกวนต่ำ เสียงที่เกิดขึ้นจะถูกรับค่าด้วยไมโครโฟนของเครื่องสมาร์ตโฟน และถูกประมวลผลด้วย Application n-track tuner เพื่อหาความถี่สั่นพ้องของผลมะม่วง ความถูกต้องของค่าความถี่จาก Application ได้จากการสอบเทียบค่าความถี่ที่ได้กับชุดล้อมเสียงมาตรฐาน



(a)



(b)

Figure 1 (a) Acoustic test equipment (b) Dulcimer stick

2. **ความต้งจำเพาะ (Specific gravity, SG)** ซึ่งนำหนักผลมะม่วงด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง(Mass of mango in air, g) และนำผลมะม่วงนั้นๆไปชั่งน้ำหนักในน้ำโดยใช้เบ็กเกอร์เติมน้ำแล้ววัดให้มะม่วงจมน้ำพอดี (Mass of mango in water, g) แล้วนำมาคำนวณหาค่า SG ด้วย equation (1)

$$SG = \frac{\text{Mass of mango in air (g)}}{\text{Mass of mango in water (g)}} \quad (1)$$

3. **ความแน่นเนื้อ** วัดความแน่นเนื้อของมะม่วงที่หั่นเป็นลักษณะลูกบาศก์ด้านละประมาณ 1 cm ทั้งแบบที่ยังมีเปลือกหุ้ม (F_peel) และแบบปอกเปลือกแล้ว (F_flesh) ที่ตำแหน่งใกล้ขั้วผล, กลางผล และใกล้ท้ายผลดัง Fig.3 ด้วย Penetrometer (Chatillon-DFGS50) ที่มีหัวกดเป็นหน้าตัดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.00 mm กดลงไปเป็นระยะ 0.5 cm ดัง Fig.4 บันทึกค่าได้ในหน่วย kg/cm²



Figure 3 Position of firmness test



Figure 4 Penetrometer

4. **การหาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total soluble solid, TSS)** ทำได้โดยปั่นเนื้อมะม่วงแล้วกรองเอาส่วนของเหลวที่ได้มาผสมน้ำเป็นสารละลายมะม่วงแล้วนำมาอ่านค่า TSS ด้วย Hand refractometer (ATAGO)
5. **การหาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity, TA)** นำสารละลายมะม่วงมาผสมกับ 0.1% ฟีนอล์ฟทาลีน แล้วทำการไทเทรตด้วย 0.1 NaOH จากนั้นคำนวณเพื่อหาค่าร้อยละของกรดมาลิกตาม equation (2)

$$\% \text{Malic Acid} = \frac{N \text{ base} \times \text{ml base} \times \text{meq.wt} \times 100}{\text{Mango juice (ml)}} \quad (2)$$

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแบ่งกลุ่ม ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS statistic 22 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำแนกกลุ่ม (Discriminant Analysis) มาช่วยในการแบ่งกลุ่มระยะความสุกของมะม่วงจากข้อมูลค่าคุณสมบัติที่ทดสอบได้ในทุกผลเพื่อแบ่งระยะการสุกของมะม่วงเป็น 3 ช่วง ได้แก่ช่วงระยะยังไม่สุก, ระยะสุก และระยะใกล้เน่าเสีย

ผลและการวิจารณ์

การเปลี่ยนไปของลักษณะทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้เมื่อจำนวนวันหลังการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้นได้ผลดังนี้ ความถี่สั่นพ้องมีแนวโน้มลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อจำนวนวันหลังการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความถี่สั่นพ้องสูงสุดประมาณ 1000 Hz ในช่วงเก็บเกี่ยวใหม่ซึ่งมีผลมาจากความแน่นของเปลือกกับเนื้อมะม่วงที่ยังไม่สุก และมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 200 Hz ในช่วงใกล้เน่าเสีย ความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนวันหลังการเก็บเกี่ยว โดยมีค่าอยู่ที่มากกว่า 1 เล็กน้อย ซึ่งหมายถึงว่ามะม่วงมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำเล็กน้อย (จมน้ำเมื่อนำไปใส่ในน้ำ) ความแน่นเนื้อทั้งการวัดแบบมีเปลือกหุ้ม และไม่มีเปลือกหุ้ม จะมีแนวโน้มลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อจำนวนวันหลังการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น โดยความแน่นเนื้อแบบวัดผ่านเปลือกจะมีค่าสูงกว่าไม่มีเปลือกหุ้มในช่วงวันที่ 1-5 เนื่องจากเปลือกมะม่วงยังมีความแข็งและแน่นในขณะที่ยังไม่สุก และค่าความแน่นเนื้อทั้งสองจะมีค่าลดลงช้าหรือใกล้เคียงกันในช่วงวันที่ 6-12 เนื่องจากเปลือกมะม่วงมีความนิ่มขึ้นเมื่อสุกและใกล้เน่าเสีย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับจำนวนวันหลังเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะบ่งบอกถึงความหวานในตัวมะม่วง โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 6 % และสูงที่สุดประมาณ 15 % ปริมาณกรดที่สามารถไทเทรตได้จะมีค่าลดลงแบบเส้นตรงจนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเทียบกับจำนวนวันหลังเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตั้งแต่วันที่ 10 จะมีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้น้อยมากใกล้เคียงศูนย์

จากลักษณะทางกายภาพที่ทำการทดลองมานั้นนำมาจำแนกแบ่งกลุ่มระยะความสุกด้วยการแบ่งกลุ่มตามค่าเฉลี่ย One way ANOVA ตามวิธีการของ Duncan โดยจะเลือกใช้ความแน่นเนื้อแบบกดผ่านผิวเปลือกเป็นหลัก และจะใช้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จำแนกร่วมจะได้ผลดังนี้

Table 1 Maturity stages classification by peel firmness and TSS

Group	Day	Maturity	F_peel(kg/cm ²)
1	1-3	Unripe	16-18
2	4-7	Ripe	5-8
3	8-12	Overripe	0.5-3

การใช้ความถี่สั่นพ้อง (f) เพื่อพยากรณ์ระยะความสุกนั้น จะทำการพยากรณ์เพื่อหาค่าความแน่นเนื้อผ่านเปลือก (F_peel) ซึ่งได้ทำการสร้างสมการโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ให้ผลดัง equation (3)

$$F_{\text{peel}} = 0.028623 * f - 5.583912 \quad (3)$$

การพยากรณ์ความแน่นเนื้อแบบกดผ่านเปลือกโดยใช้ความถี่สั่นพ้องจะมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง มีความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม (R²) 0.594 และมีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ (RMSEC) เท่ากับ 5.045 ซึ่งจะมีความสามารถในการจำแนกระยะช่วงความสุกของมะม่วงได้ดังตารางที่ 2

Table 2 Maturity stage classification by peel firmness and resonance frequency of mango

State		Predicted group membership			Total
		Unripe	Ripe	Overripe	
%	Unripe	94.8	5.2	0.0	100.0
	Ripe	6.4	70.5	23.1	100.0
	Overripe	0.0	19.4	80.6	100.0

a. 79.5% of original grouped cases correctly classified.

จาก Table 2 จะพบว่าในช่วง Unripe จะมีความแม่นยำมากที่สุดถึง 94.8% โดยช่วง Ripe กับ Overripe จะมีความแม่นยำน้อยกว่าเนื่องจากเป็นช่วงที่มีเปลือกนิ่ม และค่าความแน่นเนื้อผ่านเปลือกที่เหลือน้ำหนักหรือค่าลดลงค่อนข้างน้อย ในช่วงวันที่ 6-12 จึงทำให้ผลการพยากรณ์มีความแม่นยำต่ำกว่าช่วง Unripe

สรุป

ในการเคาะมะม่วงน้ำดอกไม้เพื่อดูความถี่สั่นพ้อง (f) พบว่า f มีค่าลดลงแบบเอกซโพเนนเชียล โดยมีค่าเฉลี่ยในช่วงหลังเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 1000 Hz และมีค่าต่ำสุดในวันสุดท้ายของการทดลองที่ 200 Hz นำค่า f ไปทำนายระยะความสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ร่วมกับค่าความแน่นเนื้อแบบกดผ่านเปลือก (F_{peel}) เนื่องจากสามารถใช้ค่า F_{peel} กับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) มาจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Duncan สามารถจำแนกได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ 1 ช่วงระยะยังไม่สุก (unripe) ในช่วงวันที่ 1-3 หลังเก็บเกี่ยว, กลุ่มที่ 2 ช่วงระยะสุก (ripe) ในช่วงวันที่ 4-7 หลังเก็บเกี่ยว และกลุ่มที่ 3 ช่วงระยะใกล้เน่าเสีย (overripe) ในช่วงวันที่ 8-12 วันหลังเก็บเกี่ยว เมื่อใช้ค่า f โดยการทำนายระยะความสุกผ่าน F_{peel} ด้วยสมการเส้นตรง $F_{peel} = 0.028623 * f - 5.583912$ โดยมีค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม (R^2) เท่ากับ 0.594 และมีค่าคลาดเคลื่อน (RMSEC) เท่ากับ 5.045 ซึ่งความถี่สั่นพ้องมีความสามารถจำแนกช่วงระยะสุกของมะม่วงรวมทั้งหมดเท่ากับ 79.5% โดยแบ่งเป็นค่าความถูกต้องในช่วงระยะยังไม่สุก เท่ากับ 94.8% ช่วงระยะสุกเท่ากับ 70.5% และช่วงระยะใกล้เน่าเสียเท่ากับ 80.6%

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ อาคารเครื่องจักรกลการเกษตร และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- จิ่งแท้ ศิริพานิช. 2549. ชีวิตวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. หน้า 80.
- อนุพันธ์ เทอดวงศ์รุ่งกุล. 2546. การวัดความแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองด้วยความถี่ธรรมชาติและความแข็งแรงก้าน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 34(4-6 พิเศษ): 17-20.
- Jha,S.N., S. Chopra and A.R.P. Kingsly. 2007. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. Journal of Food Engineering 78: 22-26

Thermal Performance Evaluation of Thermoelectric Module

Patchara Wongpaisamkit, Krawee Treeamnuk, Tawarat Treeamnuk

Abstract—This article ascribes about the thermoelectric module that conveniently creates the difference temperature between the both of its sides by supplying the electricity. The study aims to test the performance of the heat generating and heat exchanging capability of the thermoelectric module model TEC-12710 for the possibility evaluation when it will be modified in the agricultural products drying system. The experiment apparatus was prepared by install the air fin heat exchangers on the 16 cm² of both sides of the thermoelectric module and then, enforced the air flow through the system and measured the inlet-outlet of air properties. The results found that the supplying of 16 V, 8.5 A DC electricity to the module gains the air temperature from 30°C 68%RH to 52.3°C 26.8%RH on the hot side of the module. The system consumes a 40 W of power and gives the highest moisture extraction rate (MER) at 0.016 kg_{water}/h on the cold side of module by supplying of 6 V 3.5 A and it have the coefficient of performance (COP) at 1.14. It is possible to adapt this module with the drying system especially the heat pump drying system.

Keywords—thermoelectric module, moisture extraction rate, COP

I. Introduction

Nowadays the air conditioning system be important for household and industry section because the usefulness of its both cooling and heating parts. Generally, air conditioning used to improve the comfort of occupants by control temperature, humidity, air distribution and air flow rate. In addition, it can be used for food preservation such as cooling in refrigerator that can kept food longer and can applied to be used to reduce the humidity and heat of air for the drying process. Drying is a one way of food preservation that be popular because dried product can keep for a long time and can be eaten as nutritious snacks else can be easy used in cooking [1]. Drying food is the process which used warm air to removed moisture from food. In usually, the sun drying is easiest way by using surrounding air that warm and dry to

remove the moisture [2] but some tropical countries cannot do a sun drying because it need a low humidity and warm air in drying. Another way, the artificial drying is needed to solve this problem.

Heat pump

The application of heat pump system is a warm and dry air producer for food drying process. In practically, a mechanical vapor compression refrigeration (VCR) cycle was applied to pump the heat in the system. Their components are Compressor, Evaporator, Expansion valve, Condenser and the refrigerants that was used as a working fluid in system. Two components of the VCR cycle were used in heat pump system such as Compressor and Evaporator. When the refrigerant travels through evaporator, it removes the heat from evaporator and transfers to the condenser (Fig. 1).

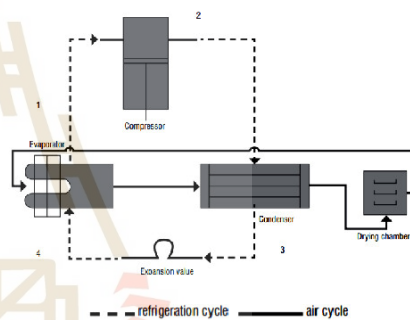


Figure 1. Heat pump VCR dryer (Closed system) [3]

From the Fig. 1 show the operation diagram of VCR closed system heat pump dryer that has two path circuits, one is air path and other is refrigerants path, both paths are separated out. The operation of the system starts by the drying air in air path was flowed by the blower. The process 1→2, air was heated up to be the drying air by condenser and it have a lower relative humidity. After that, in process 2→3 the drying air flow pass the drying chamber and lose the heat to the products while it receives the moisture from the products too. Therefore, the drying air at position (3) is high relative humidity and low temperature. Finally, in process 3→4 the humid air flow through evaporator to condense the water out and change to the dry air again. M. Fatoh [4] has been dried the Jew's mallow by VCR opened system heat pump dryer. A new air from surround was taken into the system and discharge out after through drying chamber, the maximum productivity is 5.4 kg/m²h and minimum SEC is 3.695 kJ/kg_{water}. Qi-Long Shi [5] has been used VCR dryer with the electric heater assisted in closed system for the horse mackerel drying, found the VCR dryer

Patchara Wongpaisamkit
 School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology
 Thailand

Krawee Treeamnuk
 School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology
 Thailand

Tawarat Treeamnuk
 School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology
 Thailand

in closed system is good for produce intermediate moisture food. The advantage of VCR dryer in closed system by internal recirculating the drying air is the dustless and free other outside contamination. From the previous report about usefulness of heat pump dryer however, the VCR system is a complicated system and have many components in operation. In addition, the VCR cycle use a harmful substance as a working fluid and could be hazardous effects on environment if it leaked out.

Thermoelectric module

Thermoelectric module is a thin semiconductor-based electronic device. It can directly generate the heat flux on its both sides when supplied the electricity. The difference temperature between the sides of device was affect by the heat flux generated, so its behavior looks like a small heat pump. Moreover, the module that have difference temperature between the sides can also convert the heat to electricity too. Thus, the thermoelectric applications are mainly based on those two aspects by either converting heat to electricity (TEG) or converting electricity to heat (TEC) [6]. The TEC module basics operation is applying a voltage DC power to a device to activate electron, electron will be the heat carrier from one side to the other side that make one module face cooled while the opposite face is simultaneously heated as in Fig 2.

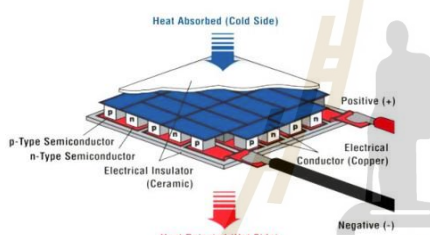


Figure 2. Thermoelectric module [7]

The thermoelectric modules popular use in air conditioning, heating and cooling system. Researchers are applying thermoelectric module in many ways. Diana Enescu [8] has been manufactured refrigerator that has a capacity of 42 liters (42x42x50 cm) by using thermoelectric module. Test result found that the ambient temperature 23°C and relative humidity about 30%RH, this refrigerator can make the minimum temperature at 8°C, for minimum energy consumption can make temperature at 15°C. Linlin Cao [9] has designed thermoelectric cooling helmet for the person that work under the high temperature environment by using TECs model TEC-12706, the internal temperature of cooling helmet is between 24-30°C which in comfort zone of human body. Hayder Al-Madhachi [10] has been constructed the water distillation system with both sides of thermoelectric module, by pump the water through the hot side of the module. The hot side temperature is about 50°C that can make the water evaporate to vapor. When the vapor pass the cool side, it will condense simultaneously. The result found the distilled water production is 28.5 ml/h with the specific energy consumption of 0.00114 kW h/ml of the 10x10x30 mm³ evaporation chamber.

The recently articles show that thermoelectric module be able to apply the both hot and cool sides of the module to an alternative operation i.e. VCR cycle. Thus, in the heat pump

function the thermoelectric module are preferable than VCR because it is smaller size, easier installation, operation and parameter adjusting. Especially it is a solid state device and never needs to use any refrigerants [11]. Therefore, the VCR might be replaced by the thermoelectric module in function of heat pump and air dehumidification of the dryer.

This research objective was to study the performance of the heat generating and heat exchanging with air of the thermoelectric module model TEC-12710 by testing and investigate the highest air temperature, heat rate in air flow, power consumption, moisture extraction rate and coefficient of performance for the possibility evaluation when it will be modified to use in the agricultural products drying system.

ii. Experimental apparatus and Testing

Experimental apparatus

The apparatus was constructed for test the thermoelectric module model TEC-12710. The system was shown in Fig. 3a that consisted of a square air duct made from acrylic plastic sheet and covered inside wall with insulation sheet. The air fins heat exchangers were installed on the both hot and cool sides of TEC module. The size of air fins heat exchanger on the hot side is larger than air fins of the cool side to discharge the self-heating that caused by heat transfer output is less than the energy input on the module. The ventilation of hot and cool air in duct are independent flow and can vary the air flow rate by each electric fan. A dry bulb temperature and relative humidity of air at position 1, 2 and 3 in Fig.3a were read by temperature and humidity sensor (ShenZhen model DHT22 FZ0757) that works with microprocessor board Arduino to collect the data from the experiment. The apparatus prototype shown in Fig. 3b.

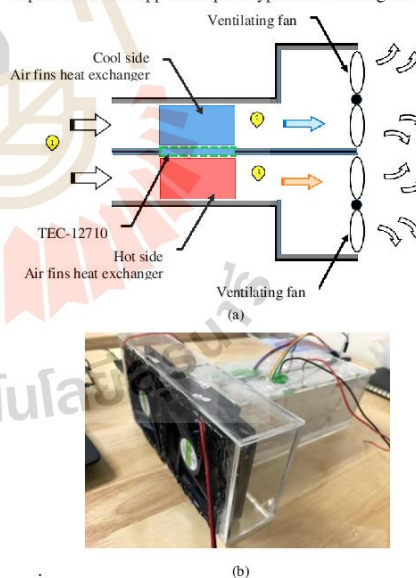


Figure 3. (a) Diagram and (b) Prototype of apparatus

Testing

Thermal performance was determined by investigate the properties of air flow through TEC module, the DC Voltage was varied and supplied to the TEC module. A couple of fans at hot and cool sides outlet air duct were independently speed controlled by varying each fan supplied DC Voltage. The Variables and its level in the testing were shown in TABLE I. The maximum DC voltage on TEC-12710 module and fans are 17.4 V and 12 V respectively and there were divided into 5 levels in the experiment. Each level of voltage supply to ventilating fan, the air flow rate was measured (Fig. 4) by electronic anemometer (Benetech model GM8901). The tubing for the flow measurement was shown in Fig 4. All treatments were test 3 replications in this experiment.



Figure 4. Air measurement while vary the fan voltage supply

The data of air from the experiment used to determine the absolute humidity (H), Enthalpy (h) and density (ρ) by Psychrometric chart [12] for the heat rate of hot side (Q_h) and cool side (Q_c) outlet air and the moisture extraction rate (MER) calculation by (1), (2) and (3) respectively.

TABLE I. VARIABLES IN EXPERIMENT

Variables and its level in experiment					
Variables	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
-Voltage input for TEC (V)	3	6	9	12	16
-Voltage input for hot side fan (V)	3	4.5	6	9	12
-Air flow rate of hot side ($\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$)	0.0106	0.0144	0.0164	0.0202	0.0229
-Voltage input for cool side fan (V)	3	4.5	6	9	12
-Air flow rate of cool side ($\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$)	0.0068	0.0089	0.0103	0.0130	0.0151

Equations

The calculation of heat rate of outlet air on hot and cool side use equations by Cengel [13]. The heat rate of air flow through the hot side of module as in (1).

$$Q_h = \dot{m} c_p (h_3 - h_1) \quad (1)$$

For the heat rate of air flow through the cool side of module as in (2).

$$Q_c = \dot{m} c_p (h_1 - h_2) \quad (2)$$

Where Q_h is the heat rate of the hot side of module (kW)

Q_c is the heat rate at the cool side of module (kW)

\dot{m} is the air flow rate (kg/s) for the hot and cool side

h is enthalpy (kJ/kg); subscript 1 is inlet, 2 is hot side outlet and 3 is cool side outlet

The moisture extraction rate (MER) was calculated by (3) that applied from Amalendu [14].

$$\text{MER} = \dot{m} (H_1 - H_2) \quad (3)$$

Where MER is moisture extraction rate ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{s}$)

H is absolute humidity ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$); subscript 3 is cool side outlet and 1 is inlet

For the coefficient of performance (COP) of the cooling ability of module, Stoecker [15] equation was selected as in (4).

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{\text{Watt of thermoelectric}} = \frac{Q_c}{I \times V} \quad (4)$$

Where I is current input to module (Amp.)

V is voltage input to module (Volt)

III. Results and discussion

Maximum hot side outlet air temperature: From the various test, the results found that if the voltage input to TEC module is increasing the module has more ability to produce the large heat too. The temperature of hot side outlet air while power input to TEC module is 16 V and 8.5 A is shown in Fig. 5

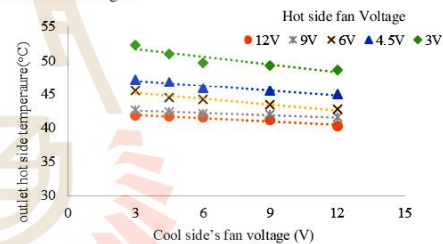


Figure 5. The hot side outlet air temperature while TEC power input is 16V 8.5A

At the high voltage supplied to TEC module, the lower air flow rate of the hot side and cool side that were affect by the low level of voltage supplied to the electric fan are inversely change with the rising of hot air temperature on the hot side outlet air. Because at lower air flow rate the air speed is very low. Then, it has enough a time for the hot side air to receive the heat flux from TEC module while the cool side air transfer its heat to the TEC module in the same time.

Maximum heat rate of hot side outlet air (Q_h): In Fig. 6a, the supplying of 16 V to the TEC module gives the maximum Q_h (shown by the left vertical axis of graph) at 0.448 kW with the electric power input of 16 V 8.5 A when we use the lowest air flow rate of the cool outlet air side with the middle air flow rate of the hot side outlet air together. The heat rate of cool side outlet air (Q_c) shown in minus value (on the right vertical axis of graph) because

under the maximum module voltage supplied, the electric fan in this experiment cannot relief the heat generated on the module rapidly enough. Finally, the self-heating effect is occurring on the module and effects a cool side outlet air temperature higher than the inlet.

Maximum heat rate of cool side outlet air (Q_c): In Fig. 6b, when we desire to avoid the self-heating effect on the TEC module by supplying the low voltage to the module. The highest Q_c that TEC module can received from the air is 0.025 kW with the electric power input to the module 6 V 3.5 A similarly in any fan flow rate. By the way, supplying the low voltage to module also effects on the low value of Q_h too.

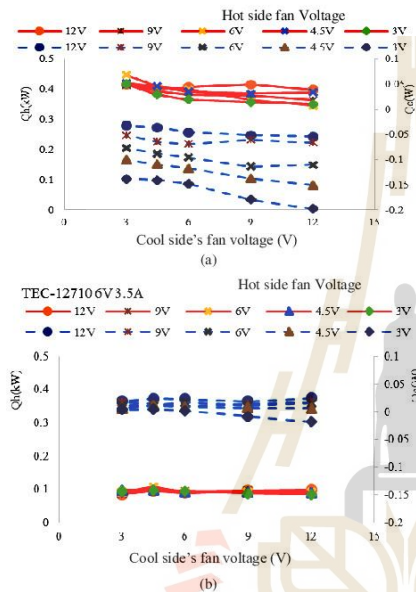


Figure 6. The heat rate of hot and cool side outlet air
 (a) when TEC's 16V 8.5A power input
 (b) when TEC's 6V 3.5A power input

From the results, the maximum values of Q_h and Q_c never occur at the same experiment condition. Therefore, the applying of TEC module with the heat pump dryer should separately use the TEC module into two sets of module and separate the power supply and its controller for use one set of module as the heater (replace with the condenser unit in VCR) and another set as the moisture extractor (replace with the evaporator unit in VCR).

Moisture extraction rate (MER): Shown in Fig. 7. The highest of MER is 0.016 kg_{water}/h at hot side air flow rate 0.0229 kg_{dry air}/s and cool side air flow rate 0.0089 kg_{dry air}/s when the TEC module was powered by 6 V and 3.5 A. But some experiment cannot calculate the MER because the self-heating effect is occurred on the hot side of TEC module due to the experiment. It makes the cool side of TEC cannot extract the moisture from the air, so the outlet absolute humidity is equal or maybe higher than the inlet.

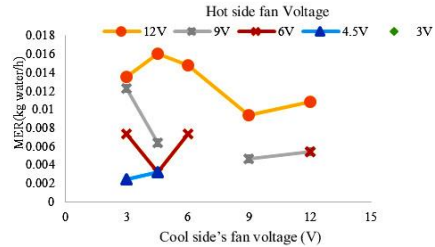


Figure 7. The MER on experiment while TEC's 6V 3.5A power input

Coefficient of Performance (COP): The interested COP of the cool side of TEC module is the worthy use in moisture extraction process. It shows in Fig. 8.

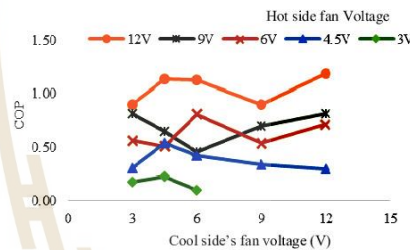


Figure 8. COP of cool side on TEC module while TEC's 16V 8.5A power input

From the results, the highest COP is 1.14 when the TEC module was supplied by 6 V 3.5 A and the air flow rate of cool side and hot side is low. Because at the low air speed the time is longer than higher air speed and the moist air can easy exchange the heat to the cool side of TEC module. After that, the air will be cool until closely to the point of dew temperature, so the moist in air will condense to the water and extract out from the air in finally.

All the appropriate parameter results were shown in the TABLE II.

TABLE II. THE RESULTS OF EXPERIMENT

Parameters	Best result	TEC supply	Hot side air flow (kg/s)	Cool side air flow (kg/s)
Hot air Temp. (°C)	52.3 ^a	16V, 8.5A	0.0106	0.0068
Q_h (kW)	0.448 ^a	16V, 8.5A	0.0165	0.0068
Q_c (kW)	0.025 ^a	6V, 3.5A	0.0229	0.0151
MER (kg _{water} /h)	0.016 ^a	6V, 3.5A	0.0229	0.0089
COP	1.14 ^a	6V, 3.5A	0.0229	0.0151

^a The best results of experiment runs

IV. CONCLUSIONS

Study of thermal performance of the thermoelectric module model TEC-12710. The results found that the supplying of 16 V, 8.5 A DC electricity to the module gains

the air temperature from 30°C 68%RH to 52.3°C 26.8%RH on the hot side of the module. The system consumes a 40 W of power and gives the highest moisture extraction rate (MER) at 0.016 kg_{water}/h on the cold side of module by supplying of 6 V 3.5 A and it have the coefficient of performance (COP) at 1.14. It is possible to adapt this module with the drying system especially the heat pump drying system. The application of TEC module with the heat pump dryer should separately use the TEC module into two sets of module and separate the power supply and its controller for use one set of module as the heater (replacing the condenser unit in VCR) and another set as the moisture extractor (replacing the evaporator unit in VCR).

Acknowledgment

The authors wish to acknowledge the Bio-System Engineering and Technology Laboratory, Suranaree University of Technology for the research support.

References

- [1] Suzanne Driessen, "Food Safety: Drying." Available at: URL:<http://www.extension.umn.edu/>. Accessed December 24, 2017.
- [2] Vivek Tomar, G.N. Tiwari and Brian Norton, "Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components," Elsevier, Solar Energy, vol. 154, pp.2-13, May 2017.
- [3] Thomas Kivevele and Zhongjie Huan, "A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa," Academy of Science of South Africa, South African Journal of Science, vol. 110, November 2013.
- [4] M. Fatouh, M.N. Metwally, A.B. Helali and M.H. Shedid, "Herbs drying using a heat pump dryer," Elsevier, Energy Conversion and Management, vol. 47, pp.2629-2643, October 2005.
- [5] Qi-Long Shi, Chang-Hu Xue, Ya Zhao, Zhao-Jie Li and Xiang-You Wang, "Drying characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in heat pump dehumidifier," Elsevier, Journal of Food Engineering, vol. 84, pp. 12-20, April 2007.
- [6] Wei He, Gan Zhang, Xingxing Zhang, Jie Ji, Guiqiang Li and Xudong Zhao, "Recent development and application of thermoelectric generator and cooler," Elsevier, Applied Energy, vol. 143, pp.1-25, December 2014.
- [7] Ashok Kumar Yadav, Shatrughan Singh and Gaurav Gupta, "Solar Air-Conditioning: Design for a Compressor-Less System using Peltier Effect," ResearchGate, International Journal of Advance Research and Innovation, vol. 2, pp.429-432, May 2014.
- [8] Diana Enescu, Alessandro Ciocia, Andrea Mazza and Angela Russo, "Solutions based on thermoelectric refrigerators in humanitarian contexts," Elsevier, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 22, pp.134-149, February 2017.
- [9] Linlin Cao, Jitian Han, Lian Duan and Chong Huo, "Design and Experiment Study of a New Thermoelectric Cooling Helmet," Elsevier, Procedia Engineering, vol. 205, pp.1426-1432, October 2017.
- [10] Hayder Al-Madhhachi and Gao min, "Effective use of thermal energy at both hot and cold side of thermoelectric module for developing efficient thermoelectric water distillation system," Elsevier, Energy Conversion and Management, vol. 133, pp.14-19, November 2016.
- [11] S. Manikandan, S.C. Kaushik and Ronggui Yang, "Modified pulse operation of thermoelectric coolers for building cooling applications," Elsevier, Energy Conversion and Management, vol. 140, pp.145-156, March 2017.
- [12] American society of heating, 2009 ASHRAE handbook: fundamentals, Atlanta:GA, 2009.
- [13] Yunus A. Cengel, Thermodynamics An Engineer Approach, 5th edition, New York city: McGraw-Hill Science, 2004.
- [14] Amlendu Chakraverty and R. Paul Singh, Postharvest Technology, Enfield: Science Publishers, 2001.
- [15] W. F. Stoeker and J. W. Jones, Refrigeration and Air Conditioning, 2nd edition, New York city: McGraw-Hill International Edition, 1982.

About Author :



Patchara Wongpaisarnkit, B. (1st Hons) Eng. (Mechanical Engineering) Suranaree University of Technology (Thailand). Currently he is a graduate Student in a Program of Mechanical Engineering and process system, Suranaree University of Technology.



Krawee Treeammuk, D. Eng. He is currently an Assistant Professor at School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology (Thailand). His research interest are mainly in the area of post-harvest machines and process, non-destructive technique, thermal process in agricultural system.



Tawarat Treeammuk, D. Eng. She is currently an Assistant Professor at School of Agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology (Thailand). Her areas of research interests are food processing, post-harvest technology, drying.

82 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2563

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก

พชร ว่องไพศาลกิจ กระวี ตรีอำนาจ* และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 30 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 20 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC12710 เป็นเครื่องปรับสภาวะอากาศที่ทำหน้าที่อุ่นและลดความชื้นอากาศชั้นต้นสำหรับเครื่องอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยคุณสมบัติการผลิตความร้อนและความเย็นที่เกิดขึ้นทั้งสองด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อนำมาลดความชื้นและอุ่นอากาศก่อนนำไปให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศอบแห้งตามต้องการในการทดสอบการทำงานของเครื่องด้วยการอบแห้งพริกชี้หนูแดงสครระหว่างการใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์และการใช้ฮีตเตอร์อย่างเดียว เปรียบเทียบผลกับการตากแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยแสงแดดตามธรรมชาติ พบว่าเครื่องปรับสภาวะอากาศสามารถควบคุมความชื้นในอากาศโดยมีอัตราการควบแน่นสูงสุดที่ 0.083 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก และสามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ประมาณ 10 องศาเซลเซียสที่ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ในด้านการทดสอบการอบแห้งพริกชี้หนูแดงสดด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถลดความชื้นพริกชี้หนูแดงลงได้เหลือเพียงร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก โดยที่สีของพริกชี้หนูแดงเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ และการใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการอบแห้งและอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงกว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าอีกทั้งยังใช้พลังงานน้อยกว่า 14 เมกกะจูล และสามารถอบแห้งได้รวดเร็วกว่าถึง 10 ชั่วโมง

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้ง; เทอร์โมอิเล็กทริก; พริก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6515 7035, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: krawee@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Drying of Chilli with Thermoelectric Air Preheater Assisted Low Temperature Dryer

Patchara Wongpaisarnkit Krawee Treeamnu^{*} and Tawarat Treeamnu^k

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Suranaree, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 30 January 2020; Revised 20 April 2020; Accepted 5 May 2020

Abstract

This research objective was to apply thermoelectric module model TEC12710 as a preheater and dehumidifier for red chillies dryer. The heat side and cool side of Thermoelectric module affected by supplied electricity were used to produce the low humidity and warm air in preheater before charging to the main electric heater of dryer. Fresh red chillies were selected as a sample in the prototype testing during the use of preheater assisted main heater and using only main heater. The test results are compared with the sample dried under the natural sun drying. The experimental results show that the preheater can condense the moisture in air with the highest MER of $0.083 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{h}^{-1}$ at cold side of thermoelectric module and can heat the air up in 10°C of temperature with hot side of thermoelectric module. The final moisture content of sample is only 10%wb with the slightly changed in color when compared with the sample from sun drying. The using of preheater with main heater gives a higher specific moisture extraction rate, lower specific energy consumption, 14 MJ energy used and can dry faster than 10 h when compared with the using of only main heater.

Keywords : Dryer; Thermoelectric Module; Chilli

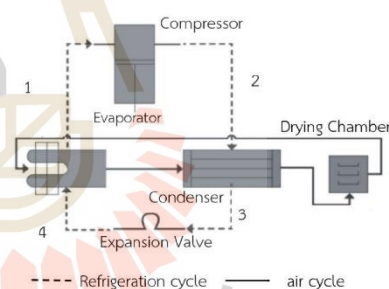
** Corresponding Author. Tel.: +668 6515 7035, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

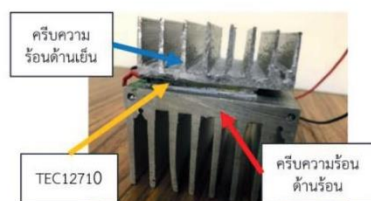
การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อเก็บรักษาผลผลิตทางเกษตร โดยที่ยังสามารถคง สารอาหารไว้ได้ [1] โดยอาศัยวิธีการขจัดความชื้น ออกจากผลผลิตทางเกษตร เนื่องจากความชื้นเป็น แหล่งสะสมของเชื้อโรคและจุลินทรีย์ที่ทำลายผลผลิต ให้เกิดการเสียหายได้ในภายหลัง การอบแห้งผลผลิต ทางเกษตรแบ่งเป็น 2 วิธี [2] ได้แก่การตากแดดตาม ธรรมชาติ (Natural Sun Drying) และการใช้เครื่อง อบแห้งเชิงกล (Mechanical Dryer) ถึงแม้ว่า การตากแห้งด้วยแสงแดดจะมีการลงทุนต่ำ ทำได้ง่าย แต่ต้องอาศัยช่วงเวลาที่แดดจัดซึ่งไม่สามารถควบคุม กระบวนการได้ ปัจจุบันการใช้เครื่องอบแห้งได้รับความ นิยมมากขึ้นเพราะสามารถอบแห้งได้โดยไม่ต้อง คำนึงถึงสภาพอากาศ นอกจากนี้ถ้าควบคุมการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่ำและไม่สัมผัสกับแสงแดดโดยตรงเป็นเวลาด นานจะสามารถรักษาคุณภาพทั้งด้านคุณค่าทางอาหาร และสีของผลผลิตให้คงเดิมหรือเปลี่ยนแปลงไปเพียง เล็กน้อย ส่งผลต่ออิทธิพลการเลือกซื้อของผู้บริโภค [3] การอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำยิ่งเหมาะสำหรับนำไปอบ แห้งผลผลิตบางชนิดที่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ดังเช่นพืชสมุนไพร หลักการของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ อาศัยการผลิตอากาศอบแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำได้โดยการลดความชื้น หรือเพิ่มอุณหภูมิต่างกัน แก่ อากาศอบแห้ง ซึ่งเพิ่มความร้อนแบบอัดไอสามารถทำได้ ทั้งการลดความชื้น และการเพิ่มอุณหภูมิต่างกัน [4]

เพิ่มความร้อนแบบอัดไอ [5] อาศัยการใช้สาร ทำความเย็นที่ไหลเวียนภายในระบบช่วยดึงความร้อน ออกจากอากาศ ด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันของสาร ทำความเย็น โดยมีอุปกรณ์ในระบบทำหน้าที่เปลี่ยน ความดันของสารทำความเย็นดังกล่าว และแลกเปลี่ยน ความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศ ในการ ประยุกต์ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบเพิ่มความร้อนเพื่อ สร้างสภาวะอากาศให้เหมาะสมกับการอบแห้ง จะ บังคับให้อากาศไหลภายในห้องอบแห้งแบบระบบปิด

(เส้นเติมในรูปที่ 1) อากาศจะถูกดูดกลืนความร้อน จนอุณหภูมิลดลง และเกิดการควบแน่นของไอน้ำใน อากาศที่ Evaporator หลังจากนั้นอากาศจะถูกบังคับ ให้ไหลผ่าน Condenser เพื่อรับความร้อนจากสาร ทำความเย็น (เส้นปะในรูปที่ 1) จนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและ ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ต่อไปอย่าง เป็นวัฏจักร T. Madhiyanon et al. [6] ได้ทำการอบ แห้งมะละกอเชื่อมด้วยเครื่องอบแห้งเพิ่มความร้อนพบ ว่าสามารถคงคุณภาพด้านสีของมะละกอเชื่อมได้ดี จากรายงานของ U. Auprakul et al. [7] ได้ทำการ อบแห้งผักตบชวาด้วยเครื่องอบแห้งเพิ่มความร้อนใช้ เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งนำไปตากแดดต่อใช้เวลาถึง 4 วัน อีกทั้งยังมีค่าสมรรถนะ (COP) สูงถึง 4.5–5.3 นอกจากนี้ T. Marnoto et al. [8] ได้ทำการสร้าง เครื่องอบแห้งเพิ่มความร้อนเพื่ออบแห้งพริกชี้หู แดง สามารถลดปริมาณความชื้นของพริกจากร้อยละ 80 มาตรฐานเปียก ให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก โดยใช้ระยะเวลาเพียง 45 ชั่วโมง



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบการทำงานของ เครื่องอบแห้งด้วยเพิ่มความร้อนระบบอัดไอ [9]



รูปที่ 2 การติดตั้งครีบน้ำร้อนบนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Module หรือ TEC Module) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็ก (ขนาด 4x4x0.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 2) เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าจะดูดกลืนความร้อนจากสิ่งแวดล้อมจนทำให้ด้านเย็นของแผ่นมีอุณหภูมิต่ำลง ในขณะที่ด้านตรงข้ามของแผ่นจะพยายามถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมจนเกิดเป็นด้านร้อนขึ้น

เทอร์โมอิเล็กทริกถูกนำไปประยุกต์ใช้หลากหลาย R. He et al. [10] นำเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น TEC12706 ไปสร้างกล่องแช่เย็นสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์สามารถลดอุณหภูมิถึง 19.01 องศาเซลเซียสด้วยการใช้พลังงาน 6 โวลต์ H. Al-Madhhachi et al. [11] ได้นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก GM250-49-45-35 ไปทำการทดสอบพบว่าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นมีความสามารถในการลดอุณหภูมิแก่อากาศลงถึง 20 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังเกิดการควบแน่นไอน้ำจากอากาศได้ 28.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยติดตั้งครีบน้ำร้อนทั้งสองด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ทำการระบายความร้อนออกจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เกิดความเย็นขึ้นอีกด้านของแผ่นซึ่งสามารถเกิดการควบแน่นของน้ำจากอากาศที่ไหลผ่านได้ นอกจากนี้ P. Wongpaisankit et al. [12] ได้ทำการทดสอบให้อากาศไหลผ่านแผ่นเทอร์โม

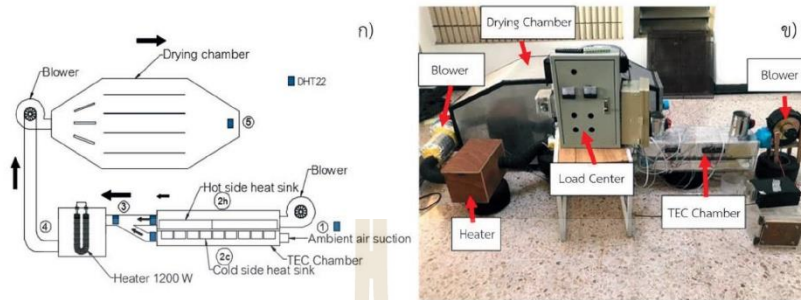
อิเล็กทริกที่ติดตั้งครีบน้ำร้อนด้วยอัตราไหลอากาศด้านร้อน 0.0229 กิโลกรัมต่อวินาที และด้านเย็น 0.0089 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแก่ TEC12710 ขนาด 6 โวลต์ 3.5 แอมป์ พบว่าเกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีอัตราการควบแน่นของความชื้นในอากาศได้ที่ 0.016 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง และพบว่าจะต้องระบายความร้อนออกจากด้านร้อนให้รวดเร็วเพียงพอระบบจึงจะทำงานได้ดีและต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนี้สามารถสร้างความร้อนและทำความเย็นซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญของปั๊มความร้อนระบบอัดไอในเครื่องอบแห้ง

จากหลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำแบบปั๊มความร้อนและการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นในการควบแน่นไอน้ำในอากาศเพื่อลดความชื้นของอากาศอบแห้งและใช้ความร้อนจากด้านร้อนช่วยในการอุ่นอากาศอบแห้งขั้นต้นให้กับระบบอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำแบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้คาดว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องอบแห้งลงได้ และช่วยทำให้เครื่องอบแห้งแบบใหม่มีขนาดเล็กลง ลดการทำงานที่ซับซ้อนของระบบทำความเย็นแบบอัดไอและไม่ต้องใช้สารทำงานที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่ยังคงได้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งที่มีคุณภาพดีเช่นเดิม

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

ต้นแบบมีห้องอบแห้งขนาด 216 ลิตร และประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาช่วยลดความชื้นในอากาศและช่วยอุ่นอากาศขั้นต้นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งติดตั้งเครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

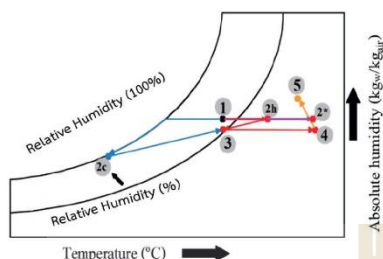
ก) ไดอะแกรม ข) ภาพแสดงเครื่องต้นแบบ

ทำการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC12710 (ขนาด 4x4x0.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลิตจากบริษัท Hebei I.T. Co.,Ltd, Shanghai) ในเครื่องปรับอากาศ (TEC Chamber) ก่อนเข้าห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ทั้งหมด 12 ตัว จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริกที่ 6 โวลต์ 3.5 แอมป์ ต่อ 1 ตัว ทำการแบ่งอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นอากาศออกเป็นสองส่วน โดยแยกไหลผ่านด้านร้อนและด้านเย็นของ TEC12710 ที่ติดตั้งไว้ทั้งด้านร้อนและด้านเย็น โดยด้านร้อนมีขนาดความกว้าง 6.6 เซนติเมตร ความยาว 6.6 เซนติเมตร และความสูง 4.0 เซนติเมตร ส่วนครีความร้อนด้านเย็นนั้นมีขนาดความกว้าง 5.3 เซนติเมตร, ความยาว 5.3 เซนติเมตร และความสูง 2.0 เซนติเมตร ครีความร้อนฝั่งร้อนมีขนาดใหญ่กว่าฝั่งเย็น เนื่องจากต้องการให้ระบายความร้อนออกได้อย่างรวดเร็ว ทำการควบคุมอัตราการไหลผ่านของอากาศด้านร้อนและด้านเย็นให้คงที่ที่ 0.023 กิโลกรัมต่อวินาที และ 0.0058 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ จากนั้นอากาศทั้งสองส่วนจะมาผสมรวมกันด้วยอัตราส่วนผสมอากาศร้อนต่ออากาศเย็น 4:1 [4] ทั้งนี้เพื่อให้อากาศหลังผสมมีอุณหภูมิ

ต่ำเกินไป หลังจากนั้นอากาศที่ผสมแล้วจะไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1,200 วัตต์ ก่อนเข้าห้องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมสตัทอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Linking รุ่น LT400 สำหรับเปิด-ปิด การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งคงที่ที่ 54 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงจนเกินไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบจากความร้อนต่อคุณภาพของวัสดุทดสอบการอบแห้ง ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นรุ่น DHT 22 ยี่ห้อ Shenzhen ทั้งหมด 5 จุด และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO R3 ทุก ๆ 5 นาที โดยได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งซึ่งมีรายละเอียดการติดตั้งเครื่องอบแห้งด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกแบบไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 3 ก) และภาพถ่ายเครื่องต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3 ข)

2.2 คุณสมบัติของอากาศในระบบ

อากาศอบแห้งในเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศของอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอากาศตามกระบวนการบนแผนภูมิ Psychrometric Chart (รูปที่ 4) ดังนี้



รูปที่ 4 Psychrometric Chart แสดงสถานะของอากาศแต่ละตำแหน่งในระบบ

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 3 ก อากาศสิ่งแวดล้อมภายนอก (ตำแหน่งที่ 1) ถูกป้อนเข้าสู่ระบบให้ไหลผ่านครีบริความร้อนด้านร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (ตำแหน่ง 2h) ด้วยเครื่องเป่าลมไฟฟ้าแบบปรับอัตราการไหลอากาศได้ กระบวนการจาก 1 ถึง 2h นี้เป็นการเพิ่มความร้อนแบบอัตราส่วนความชื้นคงที่ ทางด้านล่างอากาศจากสิ่งแวดล้อมจะถูกดูดเข้าสู่ระบบและไหลผ่านครีบริความร้อนด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (ตำแหน่ง 2c) เนื่องจากเกิดความดันลดในท่อจากผลของอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในท่อช่วงตำแหน่ง 2h ถึง 3 ประกอบกับการติดตั้งเครื่องเป่าลมตัวที่ 2 เพื่อใช้ส่งลมเข้าห้องอบแห้งอีกด้วย ที่ปลายทางเข้ามีการติดตั้งกันเพื่อควบคุมอัตราการไหลเข้าจากตำแหน่ง 1 ถึง 2c ให้มีค่าตามต้องการ กระบวนการจาก 1 จนกระทั่งผ่าน 2c เป็นการลดอุณหภูมิอากาศจนถึงจุดควบแน่นของไอน้ำในอากาศ ทำให้ความชื้นในอากาศเปลี่ยนสถานะเป็นหยดของเหลวและแยกตัวออกจากอากาศ จากนั้นอากาศจากตำแหน่ง 2h และ 2c ไหลเข้าผสมกันที่ตำแหน่ง 3 เกิดเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ ก่อนที่จะไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่ออุ่นอากาศหรือเพิ่มอุณหภูมิแบบความชื้นคงที่ อากาศที่ได้แสดงดังตำแหน่ง 4 ตามค่าอุณหภูมิที่ต้องการ อากาศที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งก่อนจะไหลออกจากระบบที่ตำแหน่ง 5 กระบวนการจาก

4 ถึง 5 จึงเป็นการเพิ่มความชื้นเข้าสู่อากาศที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ สำหรับระบบที่ตัดอุปกรณ์ปรับสภาวะอากาศขั้นต้นออกจะเป็นดังกระบวนการ 1 - 2* - 5 บน Psychrometric Chart ซึ่งอากาศที่ 2* มีความชื้นสูงกว่าตำแหน่ง 4 ในรูปที่ 4

2.3 การทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ

เลือกพริกชี้หูแดงเป็นวัสดุทดสอบการอบแห้ง เนื่องจากสีเปลี่ยนจากการอบแห้งได้ง่าย บรรจุพริกชี้หูแดงในห้องอบแห้งครั้งละประมาณ 3.5 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศอบแห้งในระบบเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเท่ากับ 54 องศาเซลเซียส แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ แบบละ 3 ชั่วโมง คือ 1) การทดสอบอบแห้งแบบเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และ 2) การทดสอบการอบแห้งแบบใช้อุปกรณ์ปรับสภาวะอากาศขั้นต้นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ระหว่างการอบแห้งทำการชั่งน้ำหนักของพริกชี้หูแดงเพื่อบันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 60 นาที จนกระทั่งน้ำหนักของพริกชี้หูแดงมีค่าลดลงน้อยมาก (น้อยกว่า 0.01 กรัมภายใน 4 ชั่วโมง บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นของตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 ตามรูปที่ 3 และบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบด้วยมิเตอร์ กิโลวัตต์ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้นำตัวอย่างพริกชี้หูแดงไปเข้าตู้อบลมร้อนยี่ห้อ France Etuves รุ่น XU058 จนกระทั่งไม่หลงเหลือความชื้นในตัวอย่างเพื่อหาค่าน้ำหนักแห้งสำหรับใช้ในการคำนวณหาปริมาณความชื้นในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการศึกษาการทดสอบอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการดังสมการที่ 1 และ 2 [13]

$$MC_w = \frac{m - m_d}{m} \quad (1)$$

$$MC_d = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (2)$$

โดยที่

MC_w = ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก

MC_d = ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง

m = น้ำหนักของวัสดุขึ้น, กิโลกรัม

m_d = น้ำหนักของวัสดุแห้ง, กิโลกรัม

ทำการคำนวณค่าสมรรถนะ 2 ช่วง คือช่วงที่ความชื้นของพริกชี้หนูแดงมีค่าเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก (ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูที่ทำกรอบแห้งทางธรรมชาติจนเข้าสู่สมดุล) [14] และช่วงสิ้นสุดการทดลอง ประเมินด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเฉลี่ยภายในระยะเวลาการทดลอง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ อัตราการควบแน่น และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ [4] สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (3), (4), (5) และ (6) ดังนี้

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (3)$$

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{P_c} \quad (4)$$

$$MER = \dot{m}_c (H_{in} - H_{out}) \quad (5)$$

$$SEC = \frac{3.6P_c}{m_i - m_f} \quad (6)$$

โดยที่

DR = อัตราการอบแห้ง, กิโลกรัมต่อชั่วโมง

$SMER$ = อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

MER = อัตราการควบแน่น, กิโลกรัมต่อชั่วโมง

SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัม

m_i = น้ำหนักก่อนการอบแห้ง, กิโลกรัม

m_f = น้ำหนักหลังการอบแห้ง, กิโลกรัม

\dot{m}_c = อัตราการไหลอากาศฝั่ยเย็น, กิโลกรัมต่อชั่วโมง

H_{in} = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศก่อนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่ยเย็น, กรัมต่อกิโลกรัม

H_{out} = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศหลังผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่ยเย็น, กรัมต่อกิโลกรัม

t = ระยะเวลาในการอบแห้ง, ชั่วโมง

P_c = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, กิโลวัตต์ชั่วโมง

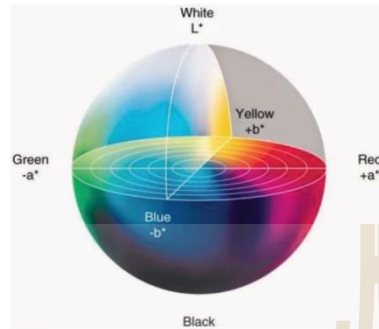
จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 แบบ กับพริกชี้หนูแดงตากแห้งด้วยแสงแดด ด้วยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีผลและก้านของพริกชี้หนูแดงตัวอย่าง

2.3 การตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง

ในส่วนของการวัดคุณภาพหลังการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงได้ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของสีผลของตัวอย่างพริกชี้หนูแดง ก่อนอบแห้งและหลังการอบแห้ง เปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นที่การทดลองเปิด และไม่เปิดเครื่องปรับสภาพอากาศกับการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ ด้วยเครื่องวัดสีชื่อ HunterLab รุ่น Color/Quest XE ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องวัดสี



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรของค่าสี (L*, a* และ b*)

ในการวัดสีใช้หลักการของการดูดกลืนแสงของสาร โดยทำการฉายแสงขาว หรือแสงที่อยู่ในช่วงรังสียูวีไปยังโมเลกุลของวัสดุตัวอย่าง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงจนเกิดการเปลี่ยนสถานะไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น [15] การวัดค่าสีได้แสดงออกมาในตัวแปรของหน่วยสีซึ่งได้แบ่งออกเป็น L*, a* และ b* โดยในส่วนของสีของแต่ละค่าตัวแปรหน่วยสีนั้นได้มีสีที่แตกต่างกันออกไปซึ่งมีการถึงแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรดังรูปที่ 6

จากการนำตัวอย่างไปทำการวัดค่าสี ค่าตัวแปรค่าสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสีนั้น สามารถนำไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าความต่างของสีของวัสดุทดสอบที่ต้องการได้ โดยทำการใช้ค่าตัวแปรของสีทั้ง L*, a* และ b* ที่ได้จากการวัดสีระหว่างตัวอย่าง 2 ตัวอย่างที่ต้องการทราบความแตกต่างเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต่างของสี (ΔE) ด้วยสมการที่ (7)

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (7)$$

โดยที่
 ΔE = ความต่างของสีระหว่างตัวอย่างที่ทำการเปรียบเทียบ

L_1^*, a_1^*, b_1^* = ค่าสีในหน่วย CIE LAB ของตัวอย่างวัสดุที่ 1
 L_2^*, a_2^*, b_2^* = ค่าสีในหน่วย CIE LAB ของตัวอย่างวัสดุที่ 2

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ความสามารถของเครื่องปรับอากาศอากาศ

ผลของการใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกในเครื่องปรับอากาศอากาศ เมื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศตำแหน่งที่ 1-5 จาก Psychrometric Chart พบว่าครีบริบความร้อนด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบแน่นความชื้นออกจากอากาศได้ในอัตรา 0.083 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 1 และเกิดเป็นหยดน้ำเกาะบริเวณครีบริบความร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นดังรูปที่ (7) สำหรับการอุ่นอากาศขึ้นต้นด้วยครีบริบความร้อนด้านร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ประมาณ 10 องศาเซลเซียส และผลการอุ่นอากาศนี้ทำให้ RH ของอากาศก่อนเข้าสู่ฮีตเตอร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 48.1 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศก่อนเข้า (Air Input) และภายหลังจากครีบริบความร้อนด้านเย็นและด้านร้อนแล้วแสดงดัง ตารางที่ 1

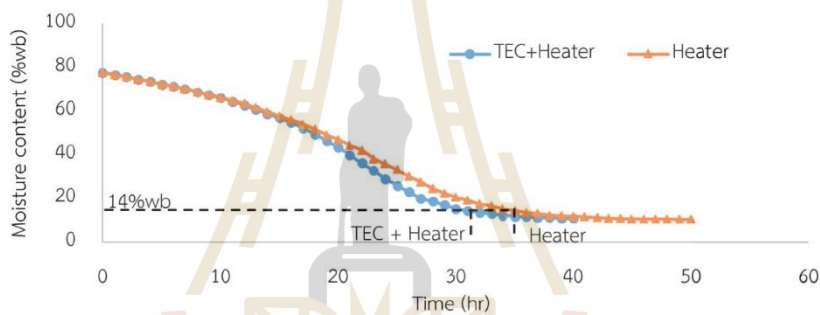


รูปที่ 7 ความชื้นควบแน่นที่เกิดขึ้นบนครีบริบความร้อนที่ติดกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 1 สภาวะของอากาศเมื่อผ่านตู้เทอร์โมอิเล็กทริก

Air input (Position 1)	Temp (°C)	23.4
	RH (%)	77
	Abs humidity (H_{in}) (g_{water}/kg_{air})	13.988
Passed TEC's cool side (Position2c)	Temp (°C)	23
	RH (%)	57
	Abs humidity (H_{out}) (g_{water}/kg_{air})	10.032
Passed TEC's hot side (Position2h)	Temp (°C)	33.1
	RH (%)	48.1

หมายเหตุ อัตราไหลอากาศด้านร้อน 0.023 กิโลกรัมต่อวินาที อัตราไหลอากาศด้านเย็น 0.0058 กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของฟริกซ์หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งสองระบบ

3.2 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

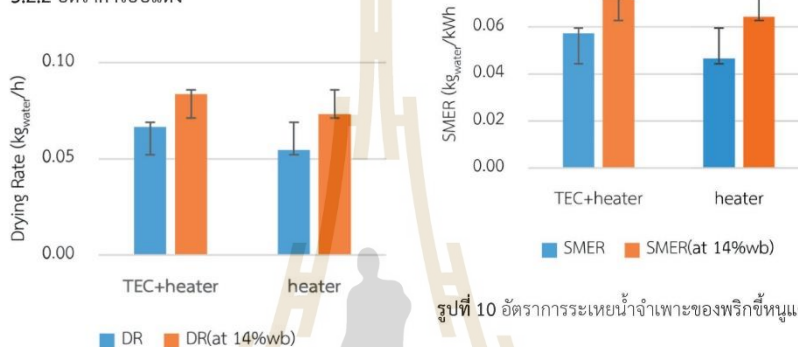
3.2.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

เมื่อทำการหาปริมาณความชื้นของฟริกซ์หนูแดงในแต่ละชั่วโมงที่ทำการอบแห้งของทั้ง 2 ระบบมาเทียบกันได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งได้แสดงปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกในแต่ละชั่วโมงของการอบแห้งของทั้งสองระบบ พบว่าค่าปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลง การอบแห้งที่อุณหภูมิ 54 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นให้ต่ำกว่าความชื้นของฟริกซ์หนูแดงที่ทำการอบแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติที่ร้อยละ 14 ความชื้นมาตรฐานเปียก

โดยระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า เริ่มมีอัตราส่วนความชื้นลดลงแตกต่างกับ ระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวอย่างสังเกตเห็นได้ในชั่วโมงที่ 10 ของการอบแห้ง โดยระบบที่มีเครื่องปรับสภาวะอากาศสามารถอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่ด้วยเวลา 40 ชั่วโมงซึ่งใช้เวลาดำกว่าระบบที่ใช้เพียงฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวถึง 10 ชั่วโมงเนื่องจากระบบดังกล่าวสามารถควบคุมความชื้นออกทำให้อากาศอบแห้งมีความชื้นต่ำซึ่งมีผลต่อการอบแห้ง นอกจากนี้ในการนำไปใช้งานจริงไม่

จำเป็นต้องอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่สามารถหยุดการอบแห้งเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่าสมดุลในสภาวะของสิ่งแวดล้อม (ความชื้นของพริกชี้หนูแดงที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) เนื่องจากประหยัดพลังงานและประหยัดเวลา

3.2.2 อัตราการอบแห้ง



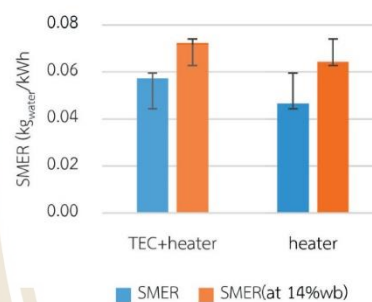
รูปที่ 9 อัตราการอบแห้งของพริกชี้หนูแดง

จากรูปที่ 9 พบว่าระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า มีความสามารถในการลดความชื้นได้ 0.0665 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีค่าอยู่ที่ 0.0546 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เช่นเดียวกันในกรณีที่ทำกราสิ้นสุดการอบแห้งที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ความสามารถในการลดความชื้นของระบบเปิดใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเป็น 0.0837 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีค่าอัตราการอบแห้งที่ 0.0733 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.2.3 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

อัตราการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดงต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 1 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ 0.0574 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีค่า 0.0466 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง



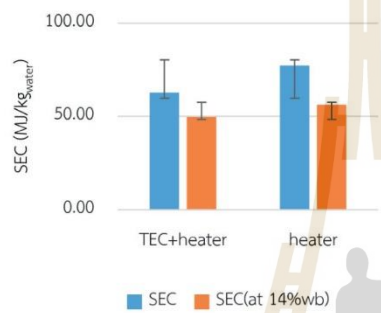
รูปที่ 10 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของพริกชี้หนูแดง

เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าทำให้ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าและส่งผลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะอีกทั้งการอุ่นอากาศก่อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกยังส่งผลให้ลดภาระการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่า แม้กระทั่งการสิ้นสุดการทดลองที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของระบบเปิดใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีค่า 0.0723 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ยังสูงกว่าของระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวโดยมีค่า 0.0644 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

3.2.4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแสดงถึงพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดง 1 กิโลกรัม พบว่าทั้งสองระบบนั้นมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง (รูปที่ 11) เนื่องจากพริกชี้หนูแดงเป็นผลผลิตที่ลดความชื้นได้ค่อนข้าง

ยากเนื่องจากผิวของพริกชี้หนูแดงมีสารเคลือบอยู่ตามธรรมชาติเพื่อช่วยรักษาความชื้นภายในเอาไว้ อีกทั้งปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงสดมีค่าสูงถึงประมาณร้อยละ 80 มาตรฐานเปียก [8] จึงต้องใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องสะสมเป็นเวลานานในการระเหยความชื้นออกจากผลพริกชี้หนูแดง ประกอบกับเครื่อง



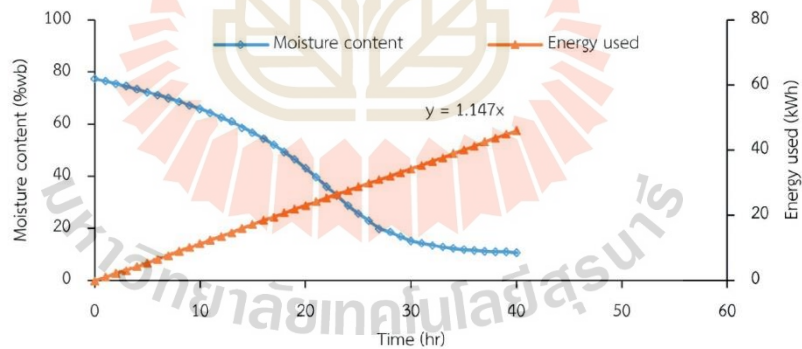
รูปที่ 11 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพริกชี้หนูแดง

อบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบเปิดคือ นำอากาศจากภายนอกเข้ามาอุ่นอากาศใหม่ไม่มีการนำอากาศ

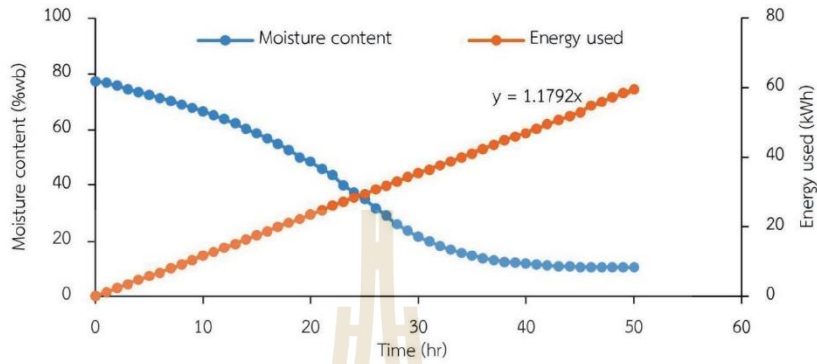
ภายในหมุนเวียนมาใช้ ส่งผลให้ต้องการพลังงานในการอบแห้งสูงตามไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสองระบบพบว่าระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับอากาศมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 62.89 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 77.47 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับกรณีที่ยุคการอบแห้งที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ระบบที่ใช้เครื่องปรับอากาศมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 49.82 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 56.24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งที่ตั้งได้อภิปรายผลไว้

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่มีค่าค่อนข้างสูงนั้นสามารถอธิบายด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นลดลงเปรียบเทียบกับพลังงานสะสมในแต่ละชั่วโมงที่ใช้ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งระบบปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นและพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงในการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบที่เปิดการทำงานของเครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นและพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงในการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

และระบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวซึ่งใช้ระยะเวลาสั้น (40 และ 50 ชั่วโมง ตามลำดับ) แสดงดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 พลังงานที่เพิ่มขึ้นต่อชั่วโมงทั้ง 2 ระบบแตกต่างกันโดยระบบที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศสูงกว่าเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้สำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกต่ำมากเมื่อเทียบกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า แต่สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ถึง 10 ชั่วโมง ส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานมากกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอีกด้วย

พริกชี้หนูแดงตากแห้งด้วยแสงแดดพบว่าเปลี่ยนเป็นสีแดงอ่อนลงเล็กน้อย ส่วนก้านพริกชี้หนูแดงมีสีเขียว



ก) ข)

3.3 คุณภาพสีของพริกชี้หนูแดงหลังการอบแห้ง
ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเมื่อเปิดการทำงานของเครื่องปรับอากาศรวมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (รูปที่ 14 ข) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียว (รูปที่ 14 ค) เปรียบเทียบกับพริกชี้หนูแดงสด (รูปที่ 14 ก) และพริกชี้หนูแดงตากแห้ง (รูปที่ 14 ง) พบว่าพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบ ผลพริกชี้หนูแดงแห้งยังคงมีผิวค่อนข้างแดง ก้านพริกชี้หนูแดงยังคงมีสีเขียวไม่แตกต่างกับก้านของตัวอย่างพริกชี้หนูแดงสด เมื่อเทียบกับ



ค) ง)

รูปที่ 14 ก) พริกชี้หนูแดงสด ข) พริกชี้หนูแดงที่อบแห้งด้วยระบบปรับอากาศเบื้องต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ค) พริกชี้หนูแดงที่อบแห้งโดยการเปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ง) พริกชี้หนูแดงตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

94 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2563

ตารางที่ 2 ตัวแปรค่าสีของผล/ก้านพริกชี้หนูแดงสดและผ่านการอบแห้งในแต่ละกรรมวิธี

ลำดับที่	วิธีการ/เครื่องมือ	วิเคราะห์สี		
		เครื่อง Hunter Lab Color/Quest XE		
		ตัวอย่าง/รายการทดสอบ	L*	a*
1	ก้านพริก วิธีที่1 TEC	49.52	-1.84	27.98
2	ก้านพริก วิธีที่2 heater	48.37	-0.86	28.6
3	ก้านพริก ตากแดด	49.84	2.86	26.89
4	ก้านพริกสด	32.41	-2.41	22.69
5	ผลพริก วิธีที่1 TEC	33.73	30.39	32.35
6	ผลพริก วิธีที่2 heater	33.97	29.4	30.79
7	ผลพริก ตากแดด	30.66	28.66	29.02
8	ผลพริกสด	27.67	36.16	38.22

- หมายเหตุ
1. ค่า L* (+) แสดงถึงความสว่าง
 2. ค่า a* (+) แสดงถึงความเป็นสีแดง
 3. ค่า a* (-) แสดงถึงความเป็นสีเขียว
 4. ค่า b* (+) แสดงถึงความเป็นสีเหลือง
 5. ค่า b* (-) แสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน

ตารางที่ 3 ผลของการเปรียบเทียบค่าสีของผลและก้านของพริกชี้หนูแดงเมื่อนำไปทำให้แห้งด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบ	delta E	
	ผลพริกชี้หนูแดง	ก้านพริกชี้หนูแดง
พริกสด - ระบบติดตั้งเครื่องปรับอากาศ	10.22	17.91
พริกสด - ระบบฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว	11.85	17.08
พริกสด - ตากแห้ง	12.24	18.68

จางลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เพราะเครื่องอบแห้งที่ใช้ทั้งสองแบบเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเพียง 54 องศาเซลเซียส อีกทั้งเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่องผลผลิตจึงสัมผัสกับอากาศร้อนด้วยเวลาที่น้อยกว่าการตากแห้งที่ใช้เวลานานถึง 5 วัน สีของพริกชี้หนูแดงจึงเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า และผลพริกแห้งชี้หนูแดงทั้ง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 14 เมื่อนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงจากการทดลอง

ไปทำการวัดค่าสีผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2 ผลที่วัดได้นำไปหาค่าความเปลี่ยนแปลงไปของสีพริกชี้หนูแดงด้วยวิธีการอบแห้งพริกชี้หนูแดงแต่ละกรรมวิธีได้ผลดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อนำพริกชี้หนูแดงไปทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งและตากแห้งวิธีทางธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับผลพริกชี้หนูแดงสด พบว่าค่าสีมีการเปลี่ยนแปลง

เล็กน้อย โดยสำหรับผลพริกชี้หนูแดงระบบที่ติดตั้งเครื่องปรับสภาวะอากาศมีการเปลี่ยนไปของสีน้อยที่สุดและผลพริกชี้หนูแดงจากการตากแห้งมีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของก้านพริกชี้หนูแดงระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวมีการเปลี่ยนแปลงสีของก้านพริกชี้หนูแดงน้อยที่สุดและก้านพริกชี้หนูแดงที่นำไปตากแห้งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเช่นกัน

4. สรุป

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องปรับสภาวะอากาศสามารถลดความชื้นของอากาศก่อนผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้ โดยในการทดสอบพบว่าอากาศที่ถูกแบ่งให้ไหลผ่านด้านร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ 10 องศาเซลเซียส ส่วนอากาศที่ผ่านด้านเย็นสามารถลดความชื้นด้วยอัตราการควบแน่นสูงสุดที่ 0.083 กิโลกรัมต่อชั่วโมง การทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดง พบว่าพริกชี้หนูแดงที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสามารถลดอัตราส่วนความชื้นได้ต่ำกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ อีกทั้งการทำงานของเครื่องอบแห้งทั้ง 2 ระบบนั้นยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการตากแห้ง พริกชี้หนูแดงอบแห้งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงสีแดงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการอบแห้งธรรมชาติที่มีสีค่อนข้างคล้ำ แต่ในการอบแห้งไม่จำเป็นต้องอบแห้งให้มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดโดยสามารถอบแห้งพริกชี้หนูแดงจนปริมาณความชื้นมีค่าร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งประหยัดเวลาและพลังงาน โดยการเปรียบเทียบระบบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 พบว่าระบบที่ใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศเทอร์โมอิเล็กทริกวัตต์นั้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า อัตราการระเหยความชื้นจากพริกชี้หนูแดงสูงกว่า และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าแบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Harmony House Foods, Inc. (2014, June 30). *Do Dehydrated Vegetables Lose Nutritional Value?*. [Online]. Available: <http://www.harmonyhousefoods.com/blog-nutritional-value-dehydrated-veggies>
- [2] S. Janjai, *Solar drying technology*, 1st ed. Nakhon Prathom: Silpakorn University, 2017.
- [3] T. Siripunkul, "Consumer needs for instant dehydrated – mixed vegetable products in Mueang District, Chiang Mai Province," Independent Study, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2007
- [4] T. Tipyavimol, "Maintaining quality of instant dried vegetable by heat pump drying technique," Research report. Nakhon Ratchasima, Suranaree University of Technology, Thailand, 2010
- [5] Aemarine. (2012, January 28). Vapor Compression System. [Online]. Available: <http://refrigerations.blogspot.com/2012/01/vapor-compression-system.html>
- [6] T. Madhiyanon, S. Sophonronarit and T. Swasdisevi, "Industrial – Scale heat pump drying," *Kasetsart J. (Nat. Sci)*, vol. 33, pp. 461-473, 1999.
- [7] U. Auprakul, J. Khonrang and P. Duangnakhorn, "Water Hyacinth Drying by Heat Pump," *The Golden Teak: Science and Technology*, years 2, vol. 1, pp. 35-40, 2015.

- [8] T. Marnoto, E. Sulistyowati, Mahereni and M. Syahri, "The Characteristic of Heat Pump Dehumidifier Drier in Drying of Red Chili (*Capsium annum L*)," *International Journal of Science and Engineer*, vol. 3, no. 1, pp. 22-25, 2012.
- [9] T. Kivevele and Z. Huan, "A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa," *S Afr J Sci*, vol. 110, no. 5/6, pp. 1-11, 2013.
- [10] R. He, H. Zhong, Y. Cai, D. Liu and F. Zhao, "Theoretical and Experimental Investigations of Thermoelectric Refrigeration Box Used for Medical Service," *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 1215-1222, 2017.
- [11] H. Al-Madhhachi and G. Min, "Effective use of thermoelectric module for developing efficient thermoelectric water distillation system," *Energy Conversion and Management*, vol. 133, pp. 14-19, 2017.
- [12] P. Wongpaisarnkit, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, "Thermal performance evaluation of thermoelectric module," in *Proceeding of 8th International Conference On Advances In Mechanical, Aeronautical and Production Techniques (MAPT2018)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, pp. 25-29.
- [13] A. Chakraverty and R. P. Singh, *Postharvest Technology: Cereals, Pulses, Fruits and Vegetables*, Enfield (NH), USA, 2001.
- [14] S. Kaleemullah and R. Kailappan, "Moisture Sorption Isotherms of Red Chillies," *Biosystems Engineering*, vol 88, issue 1, pp. 95-104, 2004.
- [15] H. Wang, J. Peng, C. Xie, Y. Bao and Y. He, "Fruit Quality Evaluation Using Spectroscopy Technology: A Review," *Sensors*, vol. 15, pp. 11889-11927, 2015.

ประวัติผู้เขียน

นายเพชร ว่องไพศาลกิจ เกิดเมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับ 1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558

ในปี พ.ศ. 2559 ได้รับทุนกิตติบัณฑิตเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย :

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการวิทยากรหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (2560). การประเมินระยะความสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเทคนิคการตอบสนองทางความถี่เสียง

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย (2561). ผลของอุณหภูมิและความชื้นอากาศป้อนเข้าที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์อเนกประสงค์ขนาดเล็ก

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ The eighth international conference on advance in mechanical, Aeronautical and Production Techniques (2018), Kuala Lumpur, Malaysia. Thermal Performance Evaluation of Thermoelectric Module

ได้เสนอบทความตีพิมพ์เผยแพร่วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2563). การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการอุ่นอากาศขึ้นต้นสำหรับเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ